

NEUGIERIG AUF MORGEN

P.M. 4,30 € 09/2018

P.M.

DAS GEHEIMNIS DES NICHTS

Forscher finden im **VAKUUM**
rätselhafte Kräfte.
Was hat das zu bedeuten?

SCHMERZ

So können wir das
Gedächtnis des Körpers
austricksen

INTERNET

Eine Festung
schützt Deutschlands
Daten-Cloud

LUFTFAHRT

Der Flughafen der
Zukunft schwimmt
im Meer

4 190 584 140 430 41 0 9

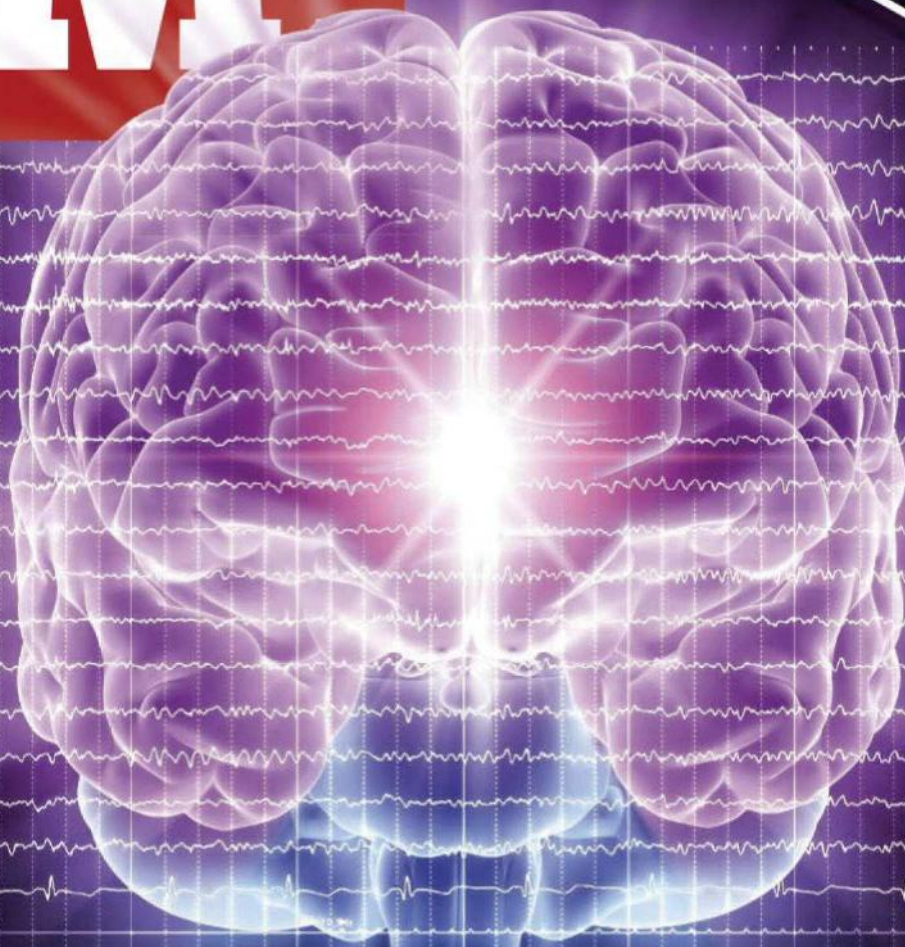
NEUGIERIG AUF MORGEN

NEU!

P.M. im TV

JETZT auf ServusTV
Mehr Infos auf
Seite 3

P.M.



WIE ENTSTEHT UNSER BEWUSSTSEIN?

Auf der Suche nach dem **URSPRUNG DES ICH** –
Wissenschaftler entwickeln radikale Ideen

OZEANE

Plankton: Die größte
Tierwanderung der Welt

ASTEROIDEN

Was tun, wenn sie Kurs
auf die Erde nehmen?

POLITIK

Ein Lobbyist erklärt die
Kunst der Beeinflussung

4,30 € 08/2018

P.M.

Österreich 4,80 € · Schweiz 7,00 sFr · Benelux 5,00 € · Spanien 5,70 € · Italien 5,70 € · Portugal (Cont.) 5,70 € · Griechenland 6,50 €

08

4 190584 140430 4

Vertikaler Flughafen

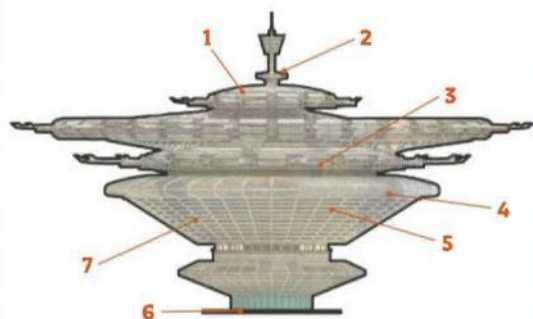
STANDORT

Los Angeles, USA

IDEE

Konventionelle Flughäfen verbrauchen gerade in Ballungsräumen durch ihre Infrastruktur (Landebahnen, Zubringerstraßen) sehr viel wertvollen Platz. Ein vertikaler Flughafen könnte das ändern.

FLUGHAFEN ALS STADT Weil man vertikale Flughäfen mitten in Ballungsräume bauen könnte, böte es sich an, sie auch mit städtischer Infrastruktur auszustatten: In diesem Entwurf sind Märkte vorgesehen, auch ganze Einkaufszentren – und sogar, für küstennahe Standorte, eine Entsalzungsanlage für Meerwasser. Herkömmlichen Düsenflugzeugen würden allerdings die Landebahnen fehlen. Deshalb setzen die Architekten auf den Trend zu Senkrechtstartern. Damit diese Maschinen die Statik des Gebäudes nicht beeinträchtigen, werden sie in ihren Einflugschächten von magnetischen Feldern getragen.



- 1 Dachgärten 2 Planetarium 3 Bauernmarkt
- 4 der eigentliche Flughafen inklusive aller Gates 5 vertikale Gärten 6 Entsalzungsanlage
- 7 intelligentes Parkhaus

ABHEB



EN!

Ein amerikanischer Architektur-Wettbewerb zeigt, wie unser Leben in Zukunft aussehen könnte. Schauen Sie! Staunen Sie!

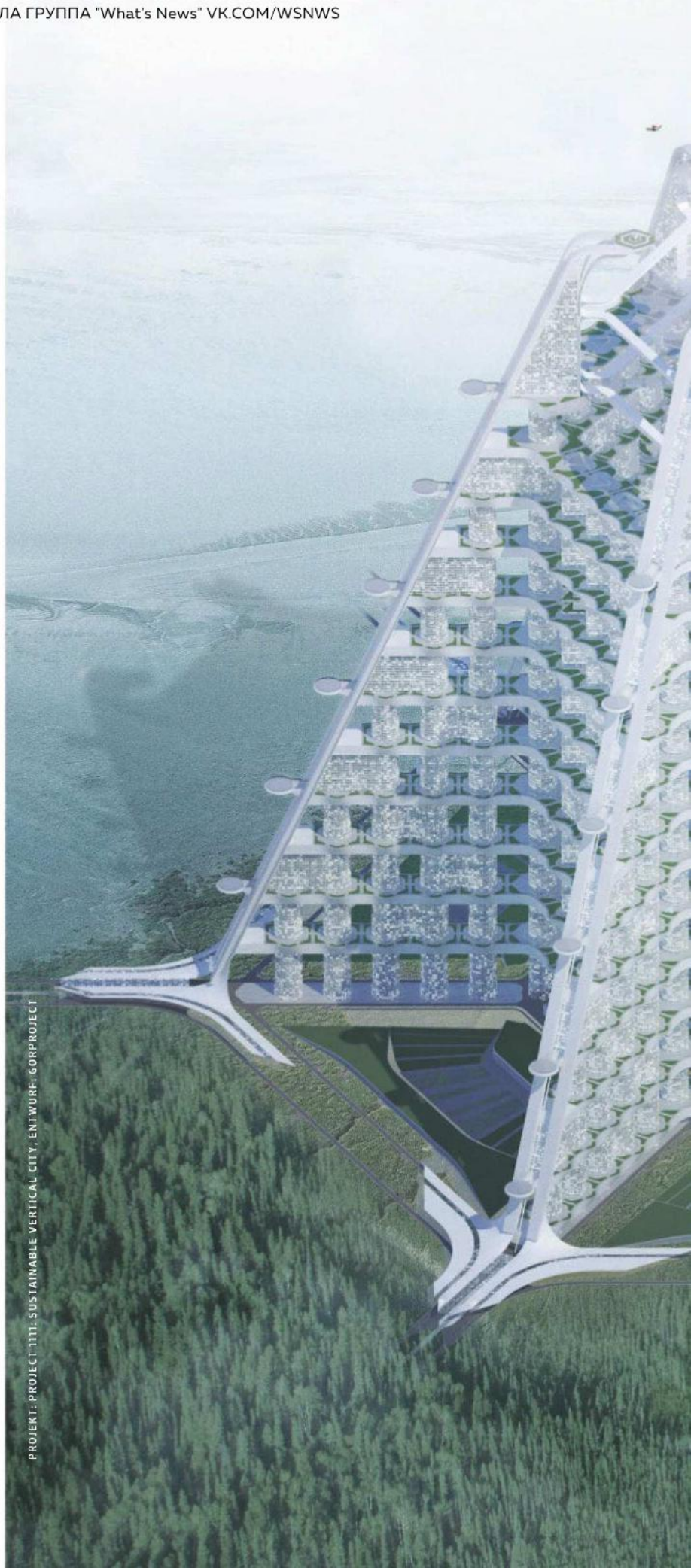
BILDER: EVOLO

»Nur die vertikale Architektur kann die wichtigste Ressource unseres Planeten bewahren – die freie, nutzbare Fläche.«

Philipp Nikandrov, russischer Architekt
des »Projekts 1111«

Spinnen die? Diese Frage könnte man stellen, angesichts der Entwürfe, die beim jährlichen Wettbewerb des US-amerikanischen Architektur-Magazins »Evolvo« eingingen: die Stadt der Zukunft, einen Kilometer in die Höhe gebaut? Ein Energieturm, der Vulkanen ihre Hitze absaugt? Oder, hier nicht im Bild, schwebende Wolkenkratzer, denen schwerste Stürme nichts anhaben können? Es stimmt: Diese Entwürfe werden wohl nicht im nächsten Jahrzehnt umgesetzt – aber vielleicht wird man in 20 Jahren froh sein, dass sich jemand schon mal Gedanken gemacht hat. Und dann heißen die Spinner von gestern »Visionäre« – ähnlich wie Konstantin Eduardowitsch Ziolkowski, der schon 1903 in seiner bis heute gültigen Raketengleichung die Bedingungen für einen Raumflug berechnete. Und von seinen Zeitgenossen sein Leben lang belächelt wurde.

P.M. hat vor zwei Jahren (P.M. 07/2016) zum ersten Mal über den weltweiten Architektur-Wettbewerb berichtet. Damals beschäftigten sich viele Entwürfe mit technischen Neuerungen: Ein riesiges, zentrales Drohnen-Depot wurde gezeichnet und ein 300 Meter hoher Serverpark. Die Zeiten ändern sich schnell: In diesem Jahrgang geht es viel öfter um Energiegewinnung und vertikales Bauen. Alle Entwürfe (es sind 526!) können Sie unter www.evolvo.us/category/competition einsehen. ■



PROJEKT: 1111: SUSTAINABLE VERTICAL CITY. ENTWURF: GORPROJECT

Projekt 1111 – vertikale Stadt

STANDORT

Ballungsräume weltweit, vor allem in Asien

IDEE

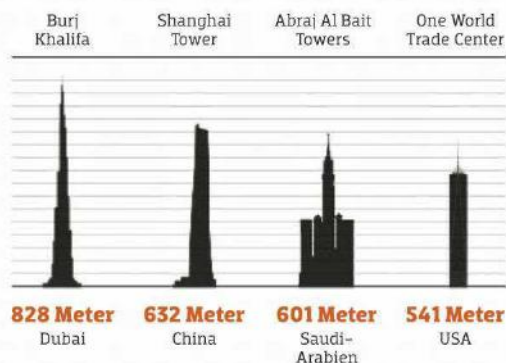
Dieser Entwurf trägt dem rasanten Bevölkerungswachstum Rechnung: In der vertikalen Stadt sollen 350 000 Menschen leben, auf nur 1,4 Quadratkilometer Grundfläche, aber auf durchschnittlich 30 Quadratmeter Wohnfläche – samt aller nötigen Infrastruktur.

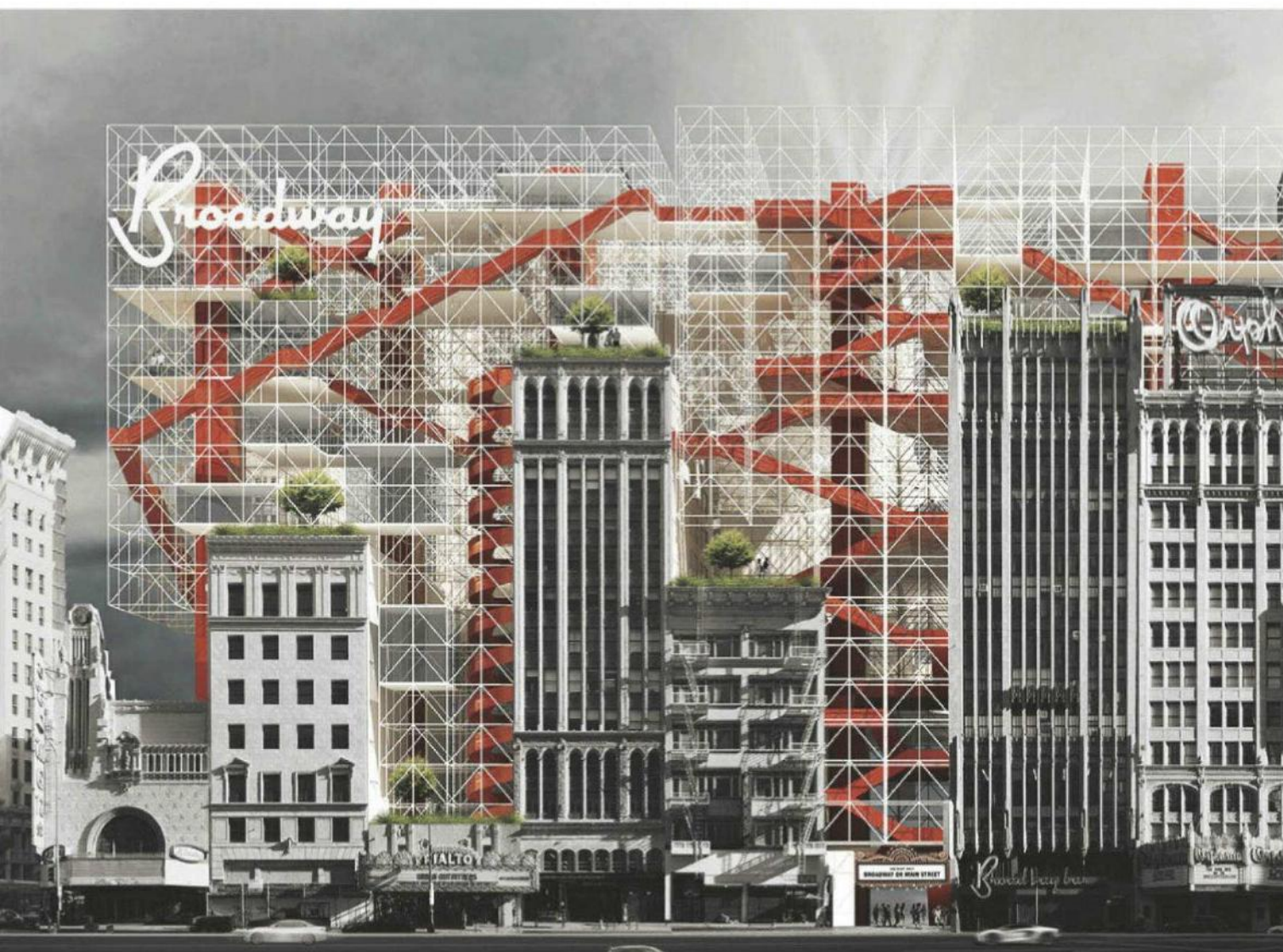
ALLES ÜBEREINANDER

1111 Meter soll die Stadt hoch sein, zusammengesetzt aus insgesamt 15 jeweils **20-stöckigen Wohnblocks**. Die sechseckige Struktur samt der ausladenden Flügel soll auch den Verkehr einer Großstadt ermöglichen: Spiralförmige Straßen mit einer fünfprozentigen Steigung erlauben auch normalen Autos, durch die Stadt zu fahren. Riesige Aufzüge sollen für eine schnelle Anbindung zwischen den einzelnen Wohnebenen sorgen, eine Drohnen-Armada wird Transportaufgaben übernehmen.

SEHR HOCH HINAUS

Projekt 1111 soll die drei höchsten Gebäude der Welt überragen – also auch das deutlich kleinere One World Trade Center.





Die Stadt begehbar machen – die schwebende Fußgängerzone

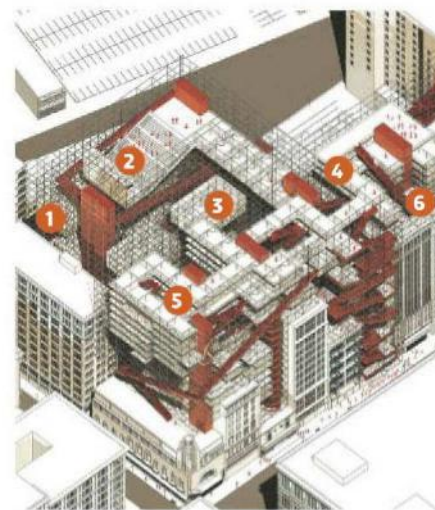
STANDORT

Broadway, Los Angeles – aber auch andere Innenstädte weltweit

IDEE

Der Broadway ist eine der berühmtesten Straßen Kaliforniens – und verfällt. Mit dieser Bebauung soll das Leben zurück in die Stadt kommen.

GELÄNDEGEWINN Verfallende Innenstädte sind ein weltweites Problem: Zu hohe Mieten für Bewohner und Ladenbetreiber, städtebauliche Planungsfehler, auch die Abkehr vom Selbergehen führen zu Geisterstädten mitten in Metropolen. Dieses Architektur-Konzept will das ändern, indem es den undurchdringlichen Betonfassaden ein durchsichtiges Kleid anzieht: Auf die Dächer, in den »Negativ-Raum« der Hochhäuser, werden **Leichtstahl-Strukturen** gesetzt, in die entstehenden Freiräume werden Museen (1) gebaut und Freilufttheater (2) eingerichtet. Boutiquen (3), Restaurants (4) und Bars (5) sollen After-Work-Bummeler anziehen. Nach Ladenschluss kann man auf einer speziell gestalteten Freitreppe (6) die Sterne betrachten. So, das ist die Hoffnung der Architekten, kehrt das Leben in die Stadt zurück.



Städtische Lunge

STANDORT

Innenstadt von Cardiff, Wales

IDEE

Vor Jahren wurden weite Teile der Lärchen-Bestände in Großbritannien von einem Schädling befallen, Zigtau-sende Bäume müssen gefällt werden. Ihr Holz soll für innerstädtische Wohnhäuser genutzt werden.

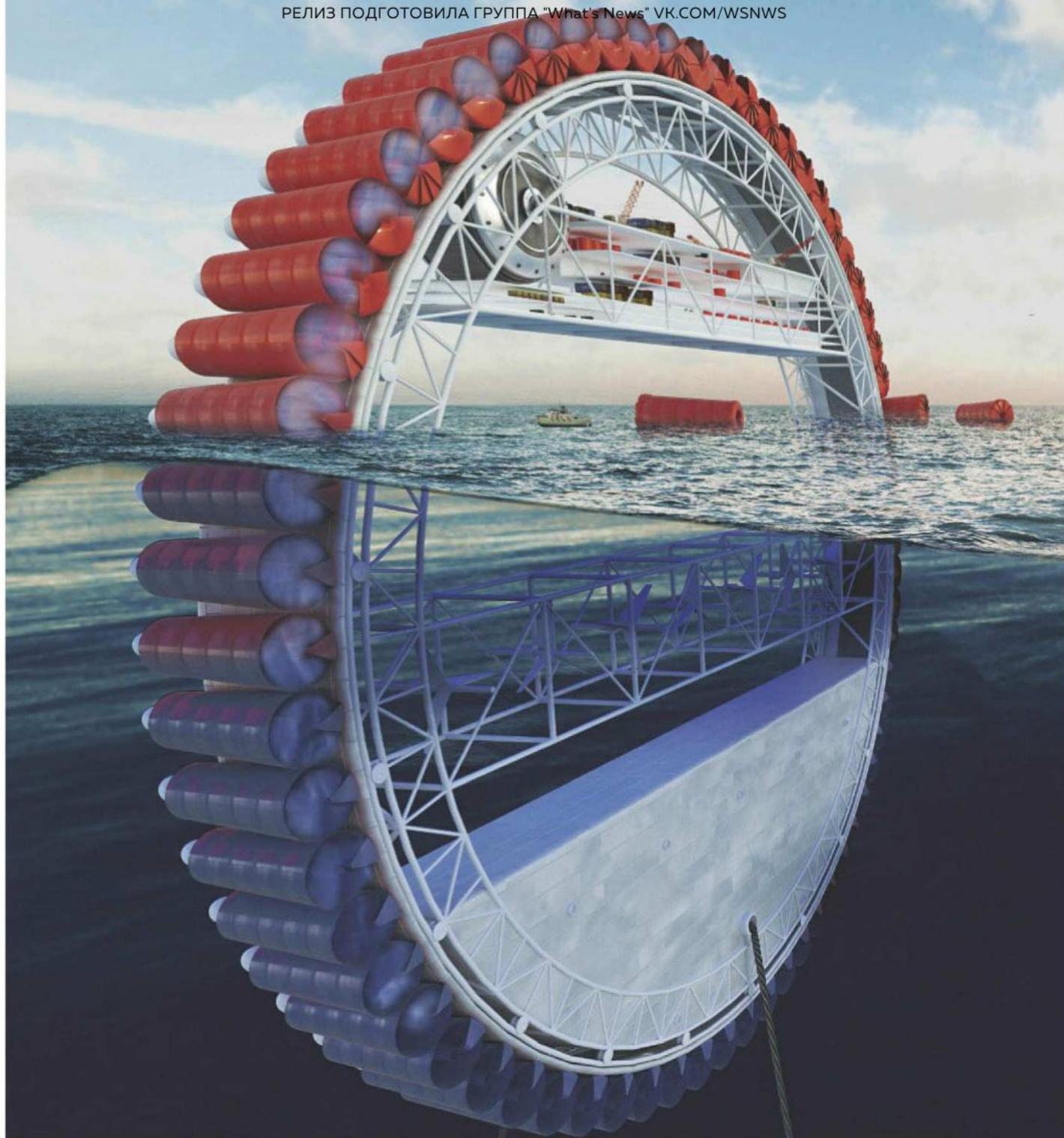
LUFTIG WOHNEN Der Entwurf der Architekten ist durchaus von der aktuellen Klimawandel-Diskussion geprägt: Ein Kubikmeter Lärchen-Bauholz bindet eine Tonne Kohlendioxid, deutlich mehr als Beton oder Stahl – für die Konstruktion der »Urban Lung« würden 5000 Kubikmeter verbaut werden. Die zukünftigen Bewohner werden die natürlichen Baumaterialien auch in der Konstruktion spüren: Im Inneren des Wolkenkratzers wird ein **durchgängiges Atrium** für natürliche Belüftung sorgen, große Dachgärten sollen den ökologischen Fußabdruck weiter verkleinern.



DIGITALES BAUKLOTZ-PRINZIP

Die **tragenden Elemente 1** des Wolkenkratzers sind modular angelegt **2** und können am Computer gestaltet werden, zu enorm niedrigen Kosten.





Meerwasser-Entsalzung mit der Eismühle

STANDORT

In allen Weltmeeren

IDEE

Mit einer raffinierten Entsalzungsmethode soll massenhaft rares Trinkwasser gewonnen und gleichzeitig der Temperaturanstieg der Ozeane gebremst werden.



EIS ZU SALZ Die »Freeze-thaw« (Einfrier-Auftau)-Entsalzung beruht darauf, dass Eiskristalle in ihrer Entstehung das Salz vom Wasser trennen. In der Eismühle werden Tanks auf **Gefrierstäbe** gesteckt, das Eis wird vom Salz gereinigt. Das wieder aufgetaute Wasser ist trinkbar, die kalten Tanks kühlen zugleich das Meer. Visionär, aber nicht verrückt: Ein Drittel der Menschheit lebt ohne Zugang zu Trinkwasser.

Transportdrohnen
holen die Blocks ab.

Die Energie wird in
transportablen Blocks
gespeichert.

Pflanzenfilter verwandeln das
Kohlendioxid per Photosyn-
these in Sauerstoff – der
durch eine Membran in die
Außenwelt abgelassen wird.

Gas wird in Biogas-
Behältern entschwefelt.

Die Pipeline pumpt
kaltes Wasser in die
Magmaschicht, der
entstehende Dampf wird
in elektrische Energie
umgewandelt.

Vulkanturm

STANDORT

In vulkanischen Gefahrenzonen weltweit

IDEE

Natürliche Energie gewinnen und Gefahren
von Menschen abwenden – der Vulkanturm könnte
beides erreichen.

ENERGIE AUS DER ERDE Vulkanausbrüche
forderten in den vergangenen Monaten viele Tote
auf Hawaii und in Guatemala. Dieses Konzept will
den Druck im Inneren der Vulkane verringern –
und gleichzeitig Energie gewinnen. Ein Rohr dringt
kilometerweit bis zur Magmaschicht vor und leitet
dann kaltes Wasser auf das flüssige Gestein.
Der entstehende Dampf wird durch eingebaute
Pflanzenfilter von Treibhausgasen gereinigt und
schließlich in elektrische Energie umgewandelt.
Diese Energie wird in transportablen
Energie-Blocks gespeichert und kann auch an
anderen Orten eingesetzt werden.



ENERGIE IN ALLE WELT

Die Energie-Blocks können leicht an Drohnen
oder Flugzeuge angedockt werden. Mit eingebau-
ten Propellern können sie kurze Strecken selbst
fliegen. Wenn man das heiße Gas in der Membran
belässt, kann auch das ganze Gebäude abheben.

DAS ENDE ALLER PROBLEME?

Londons Flughäfen sind überlastet. Diese frühe Studie für einen schwimmenden London Britannia Airport in der Themse-Mündung sah sechs Landebahnen vor, die 24 Stunden lang täglich hätten angeflogen werden können – ohne auf dem Wasser Anwohner zu stören. Schließlich beendete die britische Regierung das gesamte Projekt eines Flughafen-Neubaus aus Kostengründen.



Geht



noch **Meer?**

Wohin mit neuen Flughäfen? Bauland ist knapp, Fluglärm ungeliebt. Ingenieure sind überzeugt: Airports gehören aufs Wasser

TEXT: CHRIS LÖWER

Satt grün liegen drei kreisrunde Flugfelder in der Nordsee – wie Moleküle miteinander verbunden. In ihrer Mitte ein rundes Hafenbecken. Die drei Terminals auf den grünen Kleecken im Wasser erinnern an Seesterne. Das alles sieht nicht nur schön aus (siehe Seite 46), sondern ist auch durchdacht: Die runden Flugfelder mit ihren Start- und Landebahnen sind in die für die Flieger optimalen Startrichtungen drehbar. Dieses Konzept eines Floating Airports haben die niederländischen Architekten von Royal HaskoningDHV entwickelt. Es ist aktueller denn je angesichts steigender Fluggastzahlen und Kerosinpreise.

Joris Smits, Architekt bei Royal HaskoningDHV, kennt aber durchaus noch andere gewichtige Argumente: »Schwimmende Flughäfen sind sinnvoll, weil der Raum an Land knapp und die Lärmbelastung für Anwohner wegen des zunehmenden Flugverkehrs immer größer wird«, sagt Smits. »Und wenn die Rollbahnen in den Wind gedreht werden können, lassen sich viel mehr Flüge abfertigen.«

»Flughäfen auf schwimmenden Elementen oder künstlichen Inseln sind zukunftsweisend, das Thema kommt in einer immer dichter besiedelten Welt auf uns zu«, sagt auch Horst Stopp, Professor für Bauphysik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU). »Holland, aber auch viele

andere Weltregionen sind prädestiniert dafür.« Schließlich fressen Flughäfen immens viel Raum, sodass ein Ausweichen aufs Wasser für Stopp nur logisch ist: »Der Globus besteht zu 70 Prozent aus Wasser – es gibt also genug Reserven.«

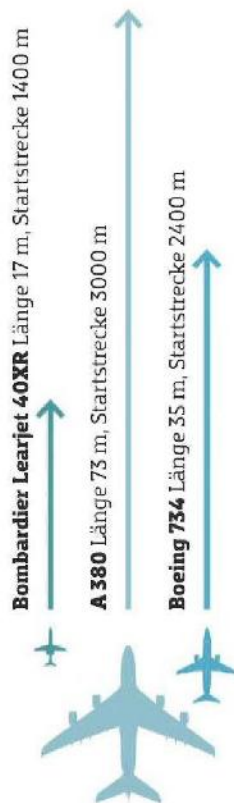
Die Idee des US-Luftfahrtingenieurs Terry Drinkard ist noch radikaler. Seine »Aerotropolis« versorgt sich dank der Lage im Meer komplett selbst mit Energie. Drinkard will Meereswärme, Wellenkraft und Windenergie für seine Flughäfen anzapfen. Eine Energie-Insel soll unweit des schwimmenden Airports vor Anker gehen und mit Windrädern bestückt werden. Terry Drinkard schwebt ein Netz von solchen mehrfach nutzbaren Einrichtungen vor: »Ein globales System kleinerer Floating Airports wäre nützlich, auch um mitten im Meer Stützpunkte für Notlandungen zu haben«, schreibt er im US-Magazin »BlueSky Business Aviation News«. »Weltweit gibt es einen Markt für mehrere Dutzend solcher Konstruktionen.«

Der US-Luftfahrtexperte und Autor Bud Slabbaert beschäftigt sich schon seit vielen Jahren mit dem Konzept schwimmender Airports: Die Produktion der in Pontonbauweise errichteten Module könnten Werften übernehmen. Die Module würden dann im Wasser verankert, wobei sich die so entstehenden Rollfelder nach Bedarf vergrößern und verkleinern ließen. Das alles in einer Ruckzuck-Bauzeit.

»Schäden ließen sich durch den Austausch einzelner Module reparieren, außerdem wäre durch die Lage im Wasser der Flughafen einfacher zu kontrollieren, etwa um ihn vor Terroristen zu schützen«, sagt Slabbaert.

Gerade im Vergleich zu städtischen Flughäfen wie etwa in Hamburg wäre der Betrieb für die Bevölkerung sicherer, weil die kritischen Starts und Landungen, bei denen die Crash-Gefahr am höchsten ist, auf dem Wasser stattfinden. Außerdem könnte ein solcher Flughafen 24 Stunden am Tag geöffnet haben, weil er niemanden störe, heißt es bei Float Incorporated aus San Diego. Die Firma entwickelt schwimmende Plattformen und hat mit »FloatPort« ein Konzept für den Heimatflughafen in San Diego vorgelegt.

Auf einer pneumatischen Plattform sollten dort nicht nur Flugzeuge, sondern auch Frachtschiffe abgefertigt werden. Allerdings sprengt der Kostenplan von 20 Milliarden US-Dollar jedes Budget. Floating Airports sind nicht billig – aber günstiger



Landräuber

Die riesigen Dimensionen moderner Passagierflugzeuge erfordern sehr lange Startbahnen. Viele Flughäfen liegen jedoch in eng bebauten Metropolregionen. Platz für neue Landebahnen und Terminals ist kaum vorhanden.

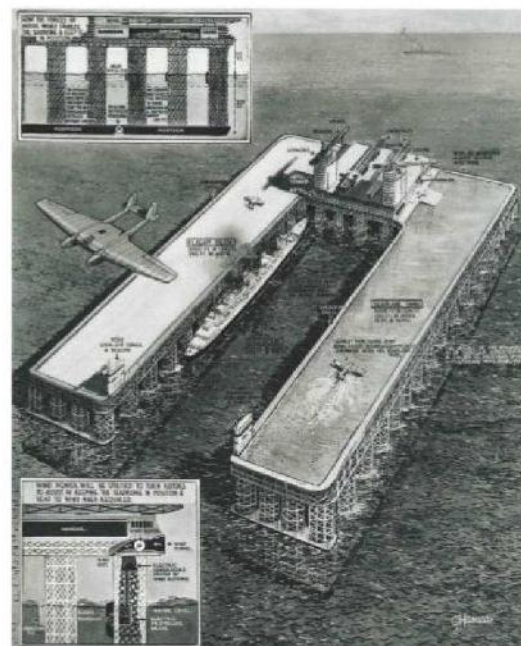


als Flughäfen an Land, wie nicht zuletzt das immens teure Trauerspiel um den Hauptstadtflughafen in Berlin zeigt. Darum lässt Slabbaert Kosten als Gegenargument nicht gelten. »An Land kann es nur individuelle und damit mehr oder weniger aufwendige Lösungen geben«, sagt er. »Ein Floating Airport ließe sich aufgrund seiner modularen Bauweise industriell in Serie fertigen, was die Kosten deutlich senkt.«

Außerdem geht Slabbaert davon aus, dass ein relativ einfacher Flughafen mit kurzen Rollbahnen auf dem Wasser zwei Drittel günstiger als einer an Land wäre, der meist ja noch mit Zufahrtsstraßen und anderen Verkehrswegen versehen werden muss. Der schwimmende Flughafen hingegen würde mit Fähren ans Land

angebunden. Wie so etwas aussehen könnte, haben 17 japanische Firmen und Forscher des Mega-Float Airport Investigation Committee in kleinem Maßstab rund um die Jahrtausendwende erprobt. In der Bucht von Tokio wurde eine 1000 Meter kurze schwimmende Start- und Landebahn erfolgreich getestet: Piloten spürten keinen Unterschied zu den Bedingungen auf festem Boden. Die Rollbahn hatte man pneumatisch gelagert, auch um erdbebensicher zu sein. Doch die Stadtregierung verlor das Interesse an dem Projekt.

Das Errichten und Betreiben eines Floating Airports wäre ohne Zweifel eine beachtliche technische Leistung. »Wind und Wellen sind gerade im offenen Meer Herausforderungen«, sagt Architekt Smits. Die Langzeit-



Insel zum Nachtanken

GESCHICHTE Flughäfen auf dem Meer zu errichten – diese Idee entstand bereits im Jahr 1937. Passagierflugzeuge waren damals nicht in der Lage, den Atlantik nonstop zu überqueren. Im Einsatz waren Flugboote: Flugzeuge mit einem schwimmfähigen Rumpf, die im Wasser starten und landen konnten. Allerdings mussten sie einen Tankstopp in Neufundland einlegen – was mit Zeitverlusten verbunden war. Der australische Ingenieur M. E. Heiser veröffentlichte darum 1937 Pläne für ein riesiges **Seadrome**. Das u-förmige Gebilde umfasste gigantische Treibstofftanks für Flugboote und Landflugzeuge sowie für den Atlantik querende Passagierschiffe. Visionär war auch Heisers Vision für die Stromversorgung des Seadrome. Die Energie für den Betrieb der Plattform-Stabilisatoren sollten nicht Verbrennungsmotoren, sondern Windkraftanlagen liefern.



IM SINKFLUG
Der auf einer künstlichen Insel errichtete Kansai International Airport in Japan sackt ab. Aufwendige Korrektursysteme halten Landebahnen und Abfertigungshallen (Foto r.) über Wasser.

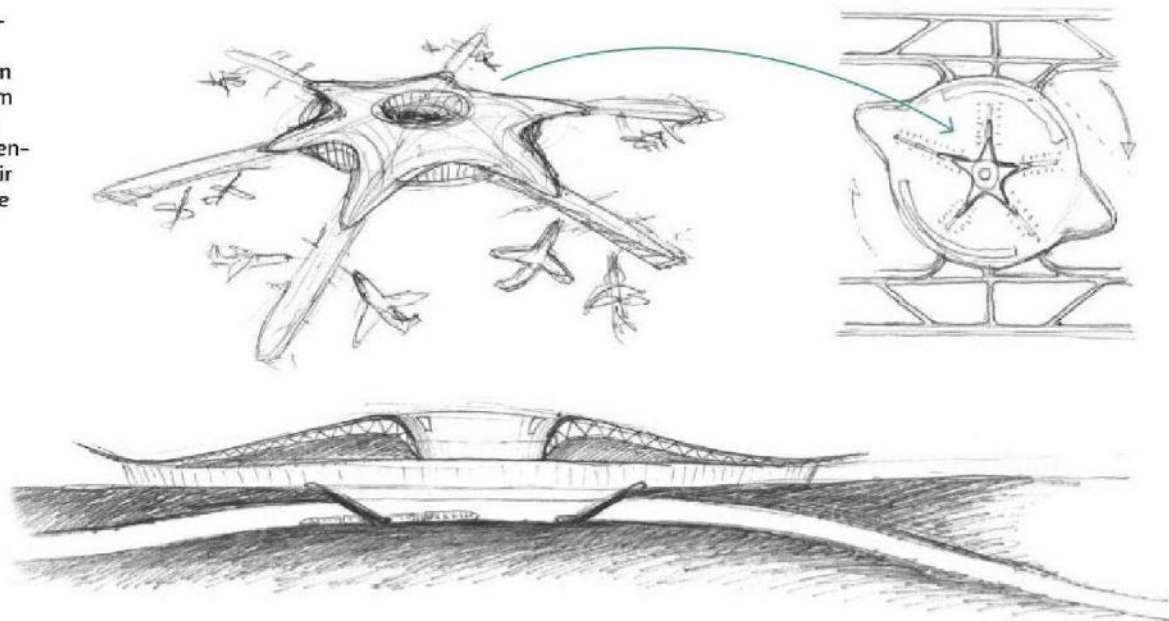


»Flughäfen auf schwimmenden Elementen oder künstlichen Inseln sind zukunftsweisend.«

Horst Stopp, Professor für Bauphysik an der BTU Cottbus



PLATZ DA! Die Niederlande sind das am dichtesten besiedelte Land Westeuropas. Ihre Küste hingegen bietet noch genügend Raum für einen Flughafen auf dem Meer. Dieser Entwurf sieht drei verbundene schwimmende Inseln vor. Sie können für Starts und Landungen in die jeweils optimale Richtung gedreht werden.





Ziel macht. In England zog die zuständige Flughafenkommission 2014 den Stecker für den London Britannia Airport, der ursprünglich als Floating Airport geplant worden war. Aber am Ende präferierte man eine konventionelle Lösung auf der Isle of Grain, um die überfüllten Hauptstadtflughäfen zu entlasten. Doch veranschlagte 57 Milliarden Euro Kosten brachten schließlich das Aus für die Flughafen-Insel.

Sind also auf dem Wasser schwimmende Flughäfen doch die bessere Lösung? Vielleicht muss diese große Idee erst im Kleinen reifen, so sieht es Floating-Airport-Verfechter Slabbaert. Warum nicht mit einem staatlich geförderten Forschungsprojekt das Eis brechen, schlägt der Amerikaner vor, etwa in Form eines kleineren Regionalflughafens? Denn: »Wenn die Fantasie mit den Projektleitern durchgeht, besteht die Gefahr, dass die Kosten durch die Decke schießen, die Akzeptanz schwindet und letztlich aus einer guten Idee reine Science-Fiction wird.«

Trotz der vielen Schwierigkeiten glaubt der Architekt Joris Smits, dass künftig verstärkt im Meer abgeflogen wird: »Ich glaube fest daran. Floating Airports werden kommen, weil unsere Städte weiter wachsen und überfüllt sein werden.« ■

P.M. KOMPAKT

- 2001 wurden in Japan Tests für eine schwimmende Landebahn erfolgreich abgeschlossen.
- **Hohe Kosten** und fehlende Erfahrung verhindern bisher die Errichtung von Floating Airports.
- Experten halten sie dennoch für die Flughäfen der **Zukunft**.



Chris Löwer hat das Drama um den neuen Berliner Flughafen täglich vor Augen. Sollte die wasserreiche Stadt über einen Floating Airport nachdenken?

ruhenden Konstruktion, die hohe Spannung, der die langen Rollbahnen ausgesetzt sind, und eine adäquate Verankerung – all das sieht Slabbaert als Probleme an, die noch geklärt werden müssen. »Allerdings können wir auf die Erfahrung und Lösungen von Ölplattformen zurückgreifen«, gibt er sich optimistisch. Auch von den Befestigungsmethoden und der Logistik auf Flugzeugträgern könne man lernen, meint Drinkard. Bei allen technischen Schwierigkeiten spielt ein Fakt den Verfechtern der Floating

Airports in die Hände: Die Alternative, Flughäfen auf künstlichen Inseln zu errichten, hat ebenso ihre Tücken. Der 1994 eröffnete Kansai International Airport in Japan kostete 15 Milliarden US-Dollar. Weil dessen spektakuläres Flughafengebäude zu schwer ist, sackt nun die Airport-Insel um 4,8 Zentimeter pro Jahr ab – mehr als erwartet. Nun muss technisch aufwendig das Absinken verhindert werden, was den Airport zu einem teuren und deshalb bei Fluggesellschaften nicht übermäßig beliebten

100%

mehr Passagiere

als 2017 werden die Fluglinien im Jahr 2036 transportieren. Das heißt: Die Abfertigungskapazitäten der Flughäfen werden sich vor allem in Asien und Amerika immens vergrößern. Neue Flugfelder sind also unvermeidlich.

NEUGIERIG AUF MORGEN

P.M.

HOCHFLIEGEND

Senkrechtstarter erobern
die zivile Luftfahrt

HOCHSPANNEND

Wo der Strom von morgen
herkommen soll

HOCHGERÜSTET

Der Krieg der Zukunft
findet im All statt

DER BEGINN DES LEBENS AUF DER ERDE

Wann? Wie? Warum?
Forscher finden neue Antworten

P.M. 4,50 € 01/2018

Österreich 4,80 € · Schweiz 7,00 sFr · Benelux 5,00 € · Spanien 5,70 € · Italien 5,70 € · Portugal (Cont.) 5,70 € · Griechenland 6,50 €



4119058414043041 01

NEUGIERIG AUF MORGEN

P.M.

Schlafforscher erklären: **So können Sie Ihre**

TRÄUME STEUERN

CHATBOTS

Unheimlich
ähnlich: Mensch
oder Maschine?

FASZIEN

Der innere
Halt unseres
Körpers

PLANET 9

Die Suche
nach dem
neuen Nachbarn

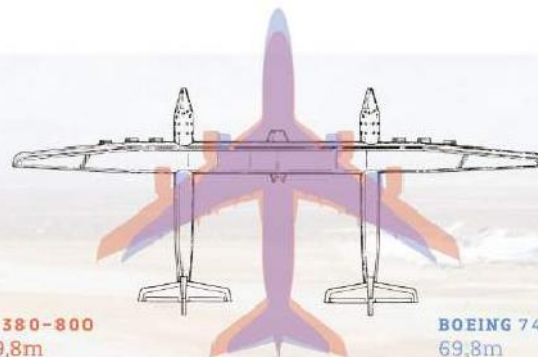
P.M. 4,00 € 08/2017

Österreich 4,50 € · Schweiz 7,00 sFr · Benelux 4,70 € · Spanien 5,30 € · Italien 5,30 € · Portugal 5,50 € · Griechenland 6,30 €

4 190584 404007 08

ALPHA





A 380-800
79,8m

BOEING 747-8
69,8m

Ein Riese rollt raus

LUFTFAHRT Anfang Juni verließ das größte jemals gebaute Flugzeug seinen Hangar in der nordamerikanischen Mojave-Wüste. **Stratolaunch** soll frühestens 2019 abheben und Satelliten tragende Raketen ins All bringen. Doch zunächst muss der 72,5 Meter lange Doppelrumpfflieger mit der Rekordspannweite von 117 Metern noch zahlreiche Tests am Boden absolvieren. Einer der Hauptinvestoren ist Paul Allen, der zusammen mit Bill Gates Microsoft gründete.



Szene eines möglichen Angriffs im All:
Ein von Airbus gebauter Erdbeobachtungs-
satellit (u.) wird vom Hochenergie-Laserstrahl
eines Kampfsatelliten (r.) getroffen.

WETTER

A satellite with large solar panels and a central antenna is shown in orbit above a cloud-covered Earth. A bright blue beam of light emanates from the satellite, pointing towards the bottom left. The background is a deep space with stars.

ÜSTEN IM ALL

Spionagesatelliten, Weltraumzäune, Space-Soldaten:
Kriege werden künftig im Orbit geführt.
Das Wettrüsten der Militärstrategen hat längst begonnen

TEXT: ALEXANDER STIRN



Liefert Daten unabhängig von Tageslicht und Wetter: ein SAR-Lupe-Aufklärungssatellit der Bundeswehr



Chinesische Rakete mit Fracht. Könnte das Land auch fremde Satelliten aus dem Orbit holen?

Der Besucher, der Mitte 2017 bei der Internationalen Raumstation ISS vorbeischaute, ist nicht angemeldet. Niemand hatte ihn auf dem Schirm. Plötzlich ist er da, und genauso schnell ist er auch wieder verschwunden. Der Überraschungsgast heißt »USA 276« und ist ein streng ge-

heimer Militärsatellit. Wie aus dem Nichts pirscht er sich bis auf 6,4 Kilometer an die Raumstation heran und umkreist sie mehrmals. Er beobachtet, wie ein Raumschiff ablegt und ein anderes von einem Roboterarm gegriffen wird. Niemand kann etwas dagegen tun. Niemand kann USA 276 stoppen.

Vielleicht, so spekuliert der niederländische Raumfahrtexperte Marco Langbroek, will das US-Militär neue Technologien testen, mit denen man näher kommende und andockende Raumfahrzeuge erkennen kann. Vielleicht will das Pentagon aber auch ein Signal senden an andere Weltraummächte wie Russland und China, die an genau solchen Annäherungsversuchen arbeiten: »Aufgepasst! Wir lassen euch nicht aus den Augen.«

Sicher ist: Die Aufrüstung im All ist in vollem Gange. Niemand traut dem anderen, jeder will wissen, was dort oben vor sich geht, und baut entsprechende Abhörtechnologien auf – die USA genauso wie Russland, Deutschland und weitere Länder. Gleichzeitig nimmt das rhetorische Säbelrasseln, vor allem aufseiten der USA, bedrohliche Formen an: Krieg im Weltraum sei »nicht länger das Zeug von Science-Fiction-Autoren«, sagt General John Hyten, Chef des Strategischen Kommandos der US-Streitkräfte. »Wir müssen in der Lage sein, Bedrohungen im All rechtzeitig zu erkennen und so entschieden zu reagieren, dass kein Feind es wagt, voller Hass eine Waffe abzufeuern.«

Die USA meinen es ernst. Zum ersten Mal seit 60 Jahren hat das Repräsentantenhaus kürzlich dafür gestimmt, einen völlig neuen Truppenteil zu gründen: das Weltraumkorps. Es soll den Krieg dorthin bringen, wo niemand zuvor gekämpft hat. Zwar sperrt sich der US-



Senat noch gegen das Vorhaben, doch mehr als zwei Milliarden Dollar wurden 2017 schon für den Kampf gegen Bedrohungen im Kosmos lockergemacht.

Deutschland baut derweil sein Weltraumlagezentrum in Uedem nahe Düsseldorf massiv aus. Als die Luftwaffe im Jahr 2009 begann, sich hier um den »Schutz der nationalen Weltrauminfrastruktur« zu kümmern, bestand die Abteilung aus einem Oberst und zwei Oberleutnants. Heute arbeiten hier 40 Soldaten und zehn zivile Mitarbeiter.

»Wir sind ziemlich stark gewachsen«, sagt Oberst Thomas Spangenberg, militärischer Leiter des Weltraumlagezentrums. Erstmals wurde im vergangenen Sommer sogar ein deutscher Verbindungsoffizier zu den US-Kollegen nach Kalifornien abkommandiert. Weitere sollen folgen, sagt Spangenberg. »Die Amerikaner wollen diesen Weg mit uns gemeinsam gehen.«

Nur trainiert wird noch getrennt. Die Ausbildung der amerikanischen »Weltraumkämpfer von morgen« (General Hyten) wurde gerade intensiviert. Vier bis sechs Monate lang werden die Soldaten darauf gedrillt, Bedrohungen der US-Satelliten zu erkennen, ihnen zu entgehen und – ganz wichtig – sich in die Denkweise eines potenziellen Angreifers hineinzusetzen. Der Krieg im Weltall wird vor allem an Konsolen und Überwachungsmonitoren ausgefochten, mit Raketen, Kamikaze-Satelliten und einer Technik, die aussieht, als stamme sie aus einem James-Bond-Film.

Es steht viel auf dem Spiel. Knapp 1500 Satelliten umkreisen derzeit die Erde, so Berechnungen des kritischen US-Wissenschaftsverbands Union of Concerned Scientists. Etwa 40 Prozent davon gehören den USA; allein das Pentagon betreibt rund 150 Späher. Verglichen damit erscheint die deutsche Flotte bescheiden: Etwa zwei Dutzend Satelliten sind für die Bundesrepublik unterwegs, von denen sieben im Dienst der Bundeswehr stehen.

»Um einen Krieg im All zu verhindern, muss man auf ihn vorbereitet sein.«

John Hyten, Air-Force-General und Chef des strategischen Kommandos der US-Streitkräfte

Satelliten auf weiten Wegen



ERDNAHE UMLAUFBAHN

Höhe: 200 – 2000 km
Geschw.: 7 km/s
Umlaufzeit: 100 min

MOLNIJA-ORBIT

Höhe: 400 – 40 000 km
Geschw.: 1,5 – 10 km/s
Umlaufzeit: ca. 12 h

GEOSYNCHRONER ORBIT

Höhe: ca. 36 000 km
Geschw.: 3 km/s
Umlaufzeit: 23 h, 56 min

MITTL. ERDUMLAUFBAHN

Höhe: ca. 20 000 km
Geschw.: 4 km/s
Umlaufzeit: 12 h

UMLAUFBAHNEN Rund 1500 Satelliten befinden sich derzeit im Weltall. Knapp 600 davon sind US-amerikanisch, China besitzt knapp 200, Russland etwa 140. Ihre Umlaufbahnen (oben eine kleine Auswahl) unterscheiden sich erheblich voneinander: So kann zum Beispiel ein geosynchroner Satellit kreisförmig, aber auch elliptisch (gelbe Bahn) um die Erde fliegen. Niedrige Bahnhöhen führen zu frühzeitigem Absturz (Verglühen), weshalb einige **Spionagesatelliten** auf stark elliptischen Bahnen fliegen – die vorübergehende große Entfernung zur Erde verlängert ihre Lebensdauer.



Apps für Satelliten

Wer fliegt wann in welcher Höhe über unsere Köpfe hinweg? Verschiedene Echtzeit-Apps, darunter der »Satellite Tracker« der NASA, ermöglichen das Verfolgen von Himmelskörpern.

Die Grenzen zwischen militärischen und zivilen Bereichen sind allerdings fließend. Ohne die militärischen GPS-Satelliten der Amerikaner stünden weite Teile des zivilen Lebens still. Die Navigations-satelliten bringen Autofahrer und Flugzeuge ans Ziel. Fehlen die hochgenauen GPS-Zeitsignale, dann funktionieren weder Ampeln noch Bahnweichen; Geldautomaten und das Internet geraten aus dem Takt. Dieselben Satelliten bringen aber auch Kampf-drohnen und intelligente Bomben an ihr Ziel.

Spionagesatelliten in niedrigen Umlaufbahnen liefern zudem ständig aktuelle Aufnahmen der Erde – entweder im sichtbaren Licht oder, wie die fünf deutschen SAR-Lupe-Späher, mit Radarkame-ras, die selbst nachts brauchbare Bilder liefern. ►

Der größte Schatz des Militärs fliegt allerdings deutlich höher, etwa 36 000 Kilometer über dem Erdboden. Dort, im sogenannten geostationären Orbit, befinden sich die Frühwarnsatelliten der Raketenabwehr, die mit ihren Infrarotsensoren Starts und Flugbahnen feindlicher Atomraketen erkennen. »Dank des Weltalls können wir schneller und mit besserer Kenntnis des Schlachtfelds operieren«, sagt die amerikanische Luftwaffen-Staatssekretärin Heather Wilson. »Mehr denn je versuchen potenzielle Gegner, uns diesen Vorteil zu nehmen.«

Das geht am einfachsten mit roher Gewalt. Bereits 1985 demonstrierte das US-Militär, dass sich mit einer umgebauten Boden-Luft-Rakete, abgefeuert von einem Kampffjet, ein Kommunikationssatellit in 500 Kilometer Höhe vom Himmel holen lässt. Im Januar 2007 zog die Volksbefreiungsarmee nach: Mit einer Mittelstreckenrakete legte China einen defekten Wettersatelliten in fast 900 Kilometer Höhe in Trümmer. Ein Jahr später sahen sich die Amerikaner gezwungen, ihr Können erneut unter Beweis zu stellen. Dieses Mal musste ein ausgedienter Spionagesatellit, der kurz vor dem Absturz stand, dran glauben.

Satelliten im deutlich höheren geostationären Orbit galten hingegen lange Zeit als sicher. Doch auch das könnte sich geändert haben. Im Mai 2013 startete China eine mysteriöse Rakete, die nach



Weltraum im Wappen

Sichtbare Zeichen der Zusammengehörigkeit: Die Abzeichen des Weltraumkommandos der U.S. Air Force und des deutschen Weltraumlagezentrums zeigen Umlaufbahnen.

zehnständigem Flug scheinbar unverrichteter Dinge wieder in die Erdatmosphäre eintauchte – angeblich ein wissenschaftliches Experiment. Brian Weeden, ehemaliger Luftwaffenoffizier und Raumfahrtexperte der amerikanischen Secure World Foundation, hat daran seine Zweifel. Nach Weedens Berechnungen erreichte die Rakete eine Höhe von mehr als 30 000 Kilometern. Offenbar simulierte sie den Abschuss eines geostationären Satelliten – zumindest sollte sie die USA nervös machen. »Wir leben in einem Zeitalter der massiv anwachsenden Anti-Satelliten-Möglichkeiten«, schreibt Weeden im Fachblatt »Space Review«.

Es geht auch subtiler: Angriffslustige Satelliten können feindliche Späher mit Lasern blenden oder beschädigen. Sie können Mikrowellen abfeuern, um die empfindliche Elektronik zu grillen. Sie können Kommunikations- und GPS-Signale gezielt stören – wie die Russen während des Ukraine-Konflikts bewiesen. All das können sie derart geschickt anstellen, dass sich kein Verursacher ausmachen lässt.

Auch das Gegenteil ist möglich: Im Jahr 2010 startete China einen Satelliten, der sich für alle sichtbar an einen zweiten Späher heranpirschte – wie USA 276 bei der ISS. Die Russen brachten in den vergangenen Jahren sogar vier kleine Satelliten ins All, die anderen Raumfahrzeugen auf die Pelle rückten, in eine ausgebrannte Raketenstufe krachten oder zwei amerikanischen Kommunikationssatelliten bedrohlich nahe kamen.

Offiziell gelten die Manöver als Tests für geplante Reparaturmissionen: Servicesatelliten sollen in Zukunft alternde Trabanten mit einem Roboterarm greifen. Sie sollen andocken, auftanken, reparieren. Oder defekte Satelliten ins Schlepptau nehmen und sie gezielt zum Absturz bringen. Auch hier gilt: All diese Technologien lassen sich sowohl friedlich als auch feindselig einsetzen.

»Deshalb ist es so wichtig, den Weltraum genau zu beobachten und zu schauen: Wer macht da oben eigentlich was?«, sagt Thomas Spangenberg vom deutschen Weltraumlagezentrum. »Solange wir wissen, wer im Weltall unterwegs ist und wie derjenige sich bewegt, ist ein direkter Angriff auf die Raumfahrtinfrastruktur eher unwahrscheinlich.« Dann kann, so die Hoffnung, bei verdächtigen Manövern rechtzeitig diplomatisch eingegriffen oder öffentlichkeitswirksam mit umfassender Vergeltung gedroht werden.

Letzte Kreise

ENDLAGERUNG Ausrangierte Satelliten werden auf eine spezielle Umlaufbahn (grau) geschossen – hier sind sie aktiven Satelliten (orange) nicht im Weg und können nicht auf die Erde stürzen. Um diesen Abschiedsflug in einen **Friedhofsorbit** antreten zu können, brauchen sie einen Rest Treibstoff an Bord. Ein weiteres Endlager ist der **Raumschiff-Friedhof** 3900 km östlich von Neuseeland: Hier werden Flugkörper, die beim Eintritt in die Erdatmosphäre nicht verglühen, gezielt im Südpazifik versenkt.





1



2



3

1 Die mit Kameras bestückten Mini-Satelliten (CubeSats) sind nicht größer als ein Päckchen. 2 Weltraumbeobachtung vom Boden aus: die 56 Meter hohe Radaranlage TIRA in Wachtberg (bei Bonn) 3 Satellitenüberwachung im Deutschen Raumfahrtkontrollzentrum in Oberpfaffenhofen (Bayern)

39A

Startrampe mit Geschichte

Von hier aus brachte 1969 »Apollo 11« den ersten Menschen zum Mond, hier hob 1981 das erste US-Space-Shuttle ab: Die Startrampe 39A in Cape Canaveral ist ein Ort der Anfänge. Auch die geheime Mission »NROL-76«, die im Frühjahr 2017 einen Spionagesatelliten ins All brachte, begann hier.

Um dabei nicht von den Amerikanern abhängig zu sein, baut Deutschland sein erstes Weltraumüberwachungsradar auf: GESTRA (German Experimental Surveillance and Tracking Radar), das unweit von Bonn entsteht, soll bereits 2018 brauchbare Daten liefern. »Dann haben wir zum ersten Mal ein eigenes Lagebild«, sagt Spangenberg.

Die USA arbeiten derweil am »Space Fence« – dem Weltraumzaun. Ein neuartiges Radar im Südpazifik soll künftig mehr als 200 000 fliegende Objekte ausfindig machen und beobachten, pro Tag rechnen die Betreiber mit 1,5 Millionen Sichtungen, zehnmal mehr als frühere Systeme. Die deutlich verkürzte Wellenlänge des neuen Radars erlaubt die Erfassung von fünf Zentimeter großen Objekten.

Hinzu kommen vier Satelliten, die den geostationären Orbit nicht aus den Augen lassen. Erst vor wenigen Jahren hat das Pentagon die Existenz dieser »Bürgerwehr im All« eingeräumt, wie General Hyten das Quartett nennt. »Wir wollten alle Welt wissen lassen, dass wir den geostationären Orbit, dieses wertvollste Stück im All, Tag für Tag genau beobachten und uns dort durch nichts überraschen lassen.«

Parallel arbeiten die Raumfahrtmächte daran, ihre Satellitenflotten widerstandsfähiger zu machen. Eine bessere Abschirmung gegen schädliche Strahlen soll dazu beitragen, genauso wie die Kommunikation über wechselnde Frequenzen, die nicht

so einfach zu stören ist. Wichtigstes Projekt der Militärstrategen sind allerdings kleinere, flexiblere Satelliten. Sie könnten sich Aufgaben teilen, die bislang in einem großen Späher vereint sind. Für Angreifer wäre es somit schwerer, wichtige Fähigkeiten des Feindes auf einen Schlag auszuschalten. Die Mini-Satelliten könnten sich aber auch identischen Aufgaben widmen – im Falle eines Abschusses übernimmt nahtlos ein anderer Trabant den Job.

Vielleicht setzt sich letztlich eine Mischung aus Abschreckung und Vernunft durch. Genauso wie ein Atomkrieg die Erde für lange Zeit unbewohnbar machen könnte, würde eine militärische Auseinandersetzung im Weltraum den Erdboden für Jahrzehnte unbrauchbar machen – weil unzählige Trümmer als umhersausende Geschosse eigene und fremde Satelliten zerstören würden. Die Menschheit wäre zurückgeworfen in die 1950er-Jahre. Einen Krieg im All, das räumen selbst die Sternenkrieger ein, kann niemand gewinnen. ■

P.M. KOMPAKT

- Raketen, Späher, Killersatelliten: Die militärische **Auf-rüstung** des Weltraums erreicht neue Dimensionen.
- Um zu wissen, was potenzielle Gegner vorhaben, wird auch die **Beobachtung** des Alls ausgebaut. Die deutsche Bundeswehr ist mit von der Partie.
- Ein **Krieg im All** würde alle Beteiligten technologisch zurückwerfen. Dieser Ausblick hilft, den Frieden zu sichern.

Wo kommt der **STROM** von morgen her?

Atom und Kohle sollen bald Vergangenheit sein, die Zukunft gehört nachhaltigen Energiequellen. Aber welche sind das, neben Wind und Sonne? Und können sie unseren Bedarf wirklich decken?

TEXT: DANIEL HAUTMANN

70%

**unserer Energie
wird importiert**

Noch ist die Abhängigkeit Deutschlands von Energie-Importen groß. Doch der Anteil heimischen Stroms aus Quellen wie Wind, Wasser und Biomasse steigt.

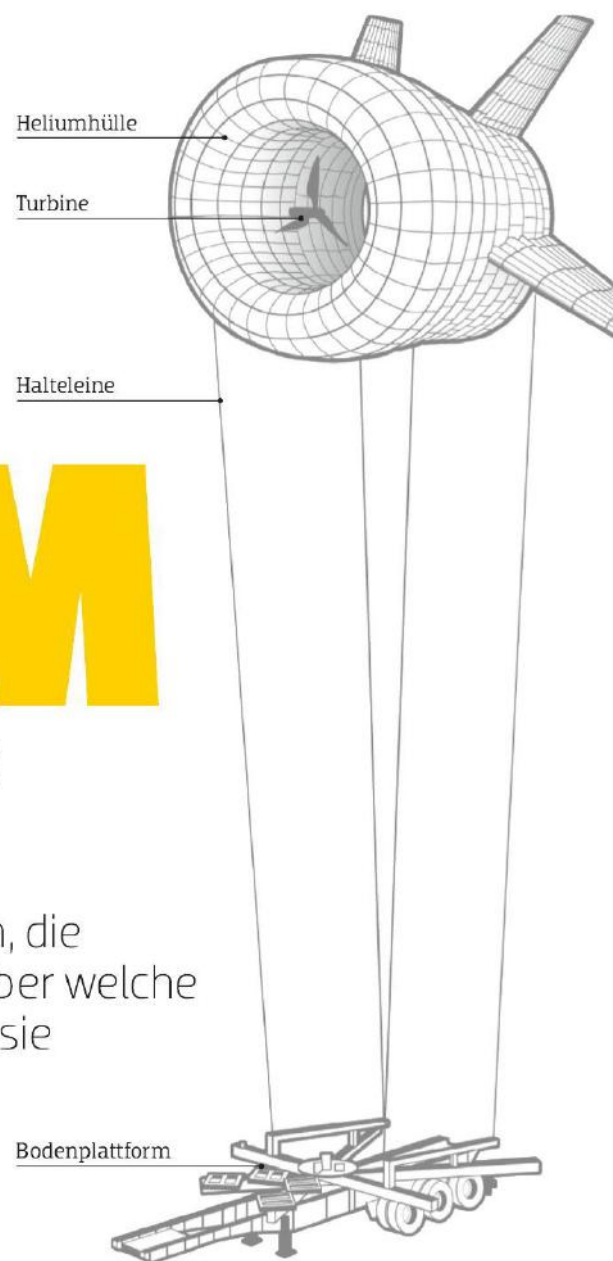
Das älteste jemals auf der Erde gefundene Eiskam aus einer Tiefe von 3270 Metern. So weit drangen die Bohrer eines internationalen Forscherteams vor, das in der Antarktis nach Klimaspuren der Vergangenheit suchte. Mit einem erschreckenden Ergebnis: Das in der Luft der Eisproben enthaltene Kohlendioxid (CO₂) unterlag im Laufe der vergangenen 800 000 Jahre zwar immer wieder starken Schwankungen – aber erst in jüngster Zeit stiegen die Mengen auf beunruhigend hohe Werte an.

»Wir müssen unseren CO₂-Ausstoß massiv reduzieren, wenn wir das Zwei-Grad-Ziel erreichen wollen«, warnt der Klimaforscher Mojib Latif vom Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel. Weniger als zwei Grad Celsius: Das ist der Grenzwert für die vom Menschen verursachte Erwärmung seit dem Beginn der Industrialisierung, der im Dezember 2015 auf der UN-Klimakonferenz in Paris festgelegt wurde.

Technisch ist diese Begrenzung durchaus machbar, und Deutschland geht mit gutem Beispiel voran. Hiesige Öko-Kraftwerke, die ihre Energie zum Beispiel mithilfe von Wasser, Wind oder Sonne erzeugen, liefern bereits ein knappes Drittel (31,7 Prozent) unseres Stroms.

Weltweit beträgt dieser Anteil nur ein Viertel. Der Trend ist allerdings eindeutig: 2015 wurden weltweit erstmals mehr Kraftwerke mit erneuerbarer Energie gebaut als fossil oder nuklear befeuerte Anlagen. In manchen Regionen ist erneuerbare Energie mit etwa zwei Cent je Kilowattstunde schon heute die billigste aller Quellen.

Und trotzdem: Die CO₂-Emissionen steigen weiter. Um das Ziel der Bundesregierung zu erreichen – 80 Prozent erneuerbare Energien bis zum Jahr 2050 –, muss unser Energiesystem massiv umgebaut werden. Die Menge an Strom, um die es dabei geht, ist gigantisch: 2016 verbrauchten die Deutschen 525 Terawattstunden – genug, um 52,5 Billionen ▶



FLIEGENDE WINDKRAFT



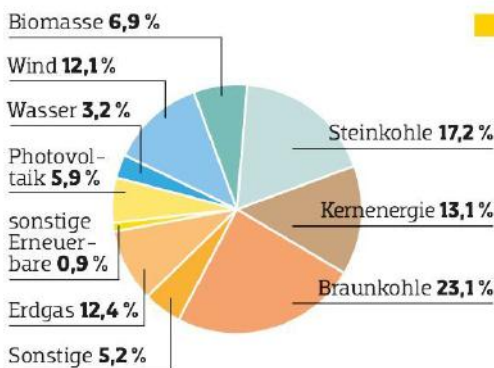
Fliegende Kraftwerke dürften schon bald regelmäßig in den Himmel aufsteigen. Ab einer Höhe von 300 Metern wehen Winde stark und so beständig, dass sie zuverlässig Rotoren antreiben können. Die kleinen Turbinen verursachen weniger Materialkosten als Windräder am Boden. Ihren **Auftrieb** bekommen sie zum Beispiel durch mit Helium gefüllte Hüllen. Den erzeugten Strom leiten sie durch die Kabel zur Erde, mit denen sie festgehalten werden.

Fort Felker, Direktor des National Wind Technology Center in den USA, sagt: »Dank dieser Technik können wir mit leistungsschwächeren Anlagen mehr Energie ernten.« Zahlreiche Prototypen fliegen schon: Die Google-Tochter Makani testet ein 28 Meter langes Kraftwerk. Es ist über eine Tonne schwer und mit acht Propellern und Generatoren bestückt.

In Deutschland sind es die Firmen Enerkite (Brandenburg) und Skysails (Hamburg), die bereits ähnliche Prototypen in der Luft haben. Interessiert ist auch der Energieversorger Eon. Er hat in das niederländische Flugwind-Unternehmen Ampyx Power investiert. Beide Firmen wollen die Fundamente und die Netzanbindung eines ehemaligen Offshore-Windparks vor Irland nutzen.

Fliegende Turbine: Sensoren melden Winddaten an die Plattform, die dann ihre Position optimiert.





Bunter Mix

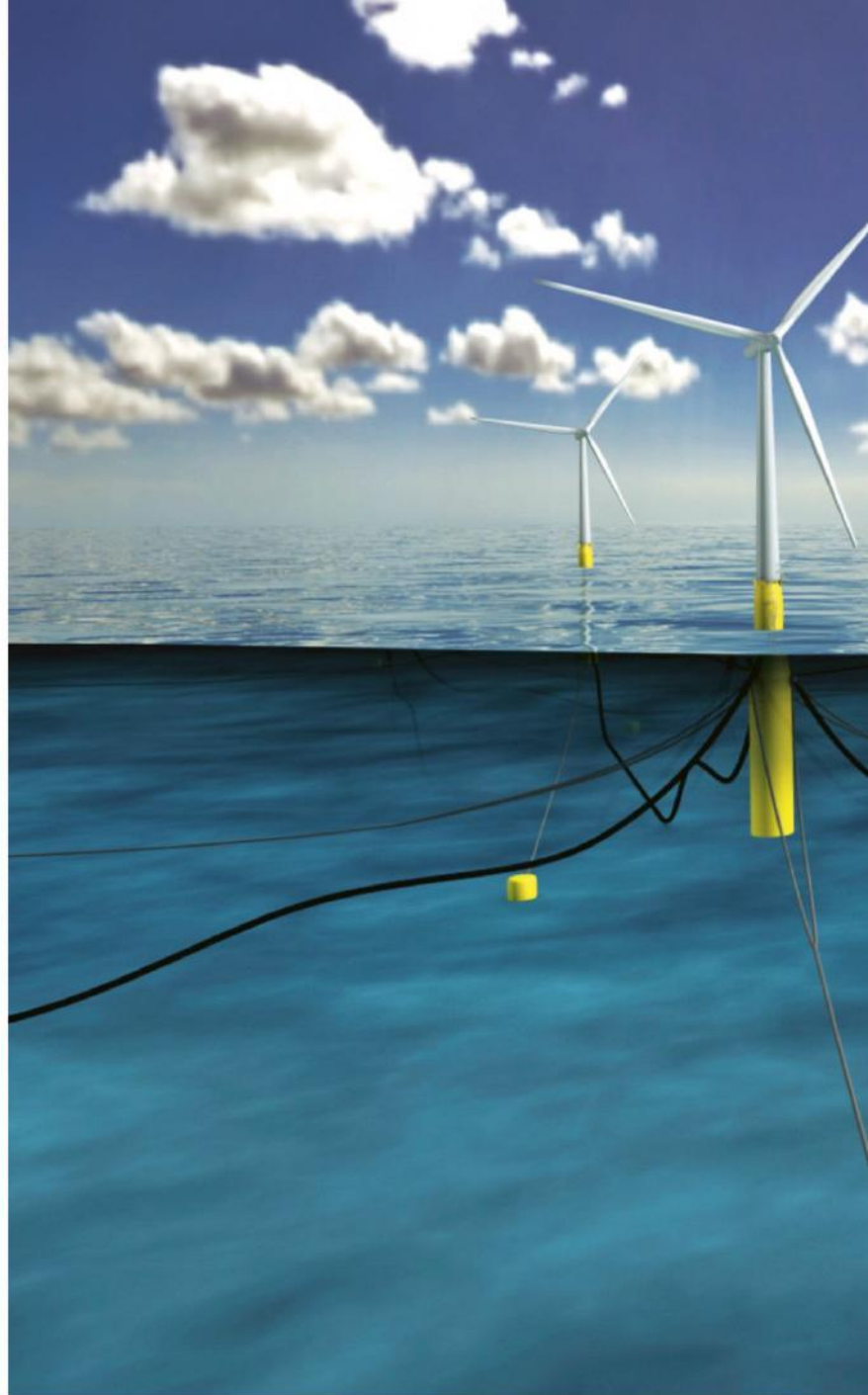
STAND AUGUST 2017 Die prozentualen Anteile der verschiedenen Energien in Deutschland haben sich seit dem Jahr 2000 zum Teil deutlich verändert. **Größter Energieträger** war früher die Kernkraft (2000 noch 29,5 Prozent), deren Anteil halbiert wurde. Nummer eins ist heute die Braunkohle, gefolgt von der Steinkohle – beide Anteile sind seit 2000 leicht gesunken (damals 25,7 Prozent und 24,8 Prozent). Erneuerbare Energien nehmen dagegen stetig zu.

Tassen Kaffee zu kochen, das sind 640 000 Tassen pro Einwohner.

Über die Hälfte davon wurde in Kohle- und Atomkraftwerken produziert. Das wird sich ändern: 2022 soll das letzte deutsche Kernkraftwerk vom Netz gehen. Auch die knapp 150 Kohlekraftwerke dürften in den Folgejahren nach und nach abgeschaltet werden.

An ihre Stelle treten zahlreiche kleine, dezentral arbeitende Kraftwerke – vom Windrad über Solarpaneele bis zur hauseigenen Biogasanlage. Geht es nach der Bundesregierung, ersetzen allein die Offshore-Windräder bis 2030 rund 20 Atomkraftwerke. Biokraftwerke und Speichergleichen künftig die naturgegebenen Schwankungen bei der Produktion von Wind- und Solarstrom aus.

Insgesamt wird der Verbrauch steigen, unter anderem durch den Ausbau der Elektromobilität. Auch deswegen werden Windräder, Wasserkraftwerke und Solarzellen in Zukunft ergänzt werden müssen durch ganz neue Methoden, mit denen sich Strom gewinnen, speichern und verteilen lässt. Wir stellen hier die interessantesten Technologien vor.



WIND-WASSERRAD



In Süddeutschland gehen schon heute Windkraft und Pumpspeicher eine zukunftssträchtige Symbiose ein. Die Sockel von vier Windturbinen, die kürzlich in Gaildorf bei Stuttgart auf einem Bergrücken gebaut wurden, dienen gleichzeitig als Wasserspeicher. Über Rohrleitungen sind sie mit einem Kraftwerk und dazugehörigem Unterbecken 200 Meter tiefer im Tal verbunden. Mit Windkraft wird Wasser aus dem Unterbecken in die Turmspeicher gepumpt. Dieses Wasser, bis zu 160 000 Kubikmeter, fließt bei Bedarf über Turbinen zurück und erzeugt bis zu 70 000 Kilowattstunden Strom.



SCHWIMMENDE WINDRÄDER



Einzelne schwimmende Windanlagen gibt es schon länger. Der norwegische Energiekonzern Statoil ist Pionier dieser Technik und baut zurzeit vor Schottland die weltweit erste schwimmende Windfarm auf. Getragen werden die 360 Tonnen schweren Siemens-Windräder von zylinderförmigen **Stahlbojen**, die angekettet aufrecht im Meer treiben. Rund 80 Meter sind unter Wasser, die Gesamthöhe der einzelnen Anlagen beträgt 258 Meter. Michael Hannibal, Geschäftsführer Offshore Wind bei Siemens, ist sicher, dass »Floating Wind« ein Erfolg wird: »Wir erwarten im Bereich der schwimmenden Windkraftanlagen weitere Kostensenkungen, die wiederum den Ausbau vorantreiben.«

Tatsächlich ist das globale Energiepotenzial für Schwimm-Windräder gigantisch: »Durch die vorhandene Meeresoberfläche ist es um ein Vielfaches größer als der globale Energiebedarf«, sagt der Energieforscher John Olav Tande vom norwegischen Forschungsverbund Sintef. Weil der Wind weit draußen auf hoher See stark und beständig weht, könnte die Windkraft nach optimistischen Schätzungen Atom-, Gas- und Kohlekraftwerke überflüssig machen.

»Das Potenzial für schwimmende Windräder ist größer als der Energiebedarf.«

John Olav Tande, norwegischer Energieforscher

Der Speicher soll schnell hoch- und heruntergefahren werden, um zuverlässige Regelleistung zur Stabilisierung des Stromnetzes zu liefern. »Wir fahren aus dem Stand in 30 Sekunden auf Vollast. Pro Tag rechnen wir mit zehn bis 50 Start-Stopp-Vorgängen«, sagt Alexander Schechner, einer der beiden Geschäftsführer der Naturspeicher GmbH, die das Kraftwerk betreibt. Seit dem 26. Oktober 2017 ist es offiziell: Eines der vier Windräder in Gaildorf ist mit einer Nabenhöhe von 178 Metern und einer **Turmhöhe von 246,5 Metern** das höchste der Welt.



FOTOS: STATOIL, DPA PICTURE-ALLIANCE

PHOTOVOLTAIK

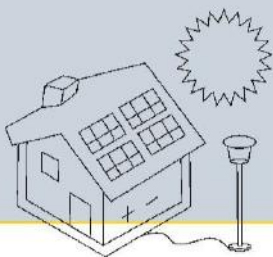


Die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom (Photovoltaik) wird an Bedeutung gewinnen – so wie hier im bayerischen Buckendorf, wo in einem 17 Hektar großen Solarpark bei Sonnenschein fünf Millionen Kilowattstunden Strom erzeugt werden, genug für den Bedarf von rund 1500 Haushalten. Heute arbeiten in Deutschland Module mit insgesamt rund 40 Gigawatt Leistung. Dieser Anteil soll aber noch gesteigert werden: Experten prophezeien, dass die Sonnenenergie vor allem in **Kombination mit Batterien** in Haushalten und im Gewerbe einen Aufschwung erleben wird. Doch wenn in Zukunft der Bedarf an photovoltaisch erzeugtem Strom steigt – wo sollen all die Solarmodule stehen? Bahngleise könnten damit überbrückt werden, denkbar sind auch in Straßen und Radwegen integrierte Module. Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen haben ausgerechnet, dass 15 Prozent der deutschen Straßen und Schienenwege ausreichen würden, um das ganze Land komplett mit Strom zu versorgen.



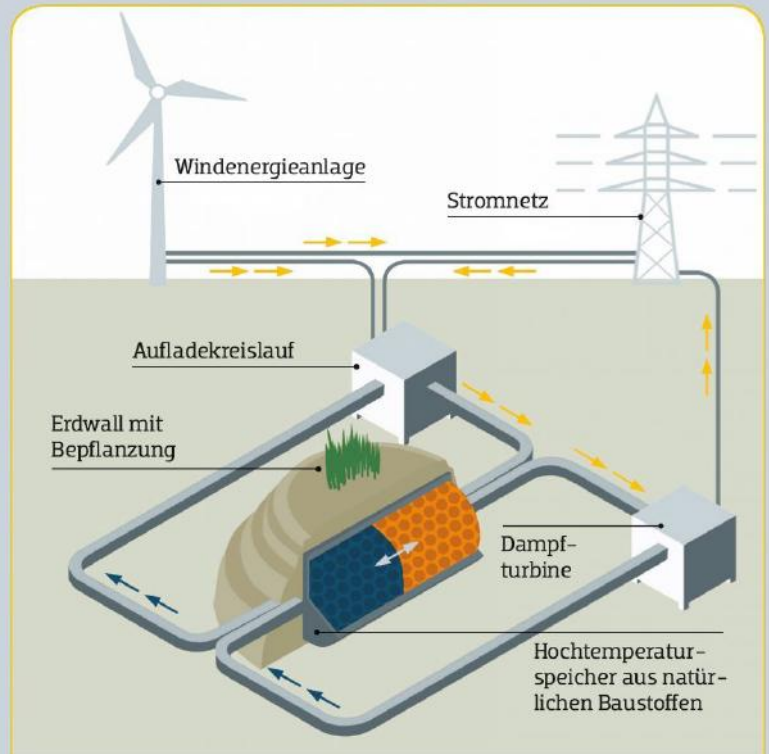
WAS HEISST »STROMVERBRAUCH«?

Um den Stromverbrauch zu ermitteln, muss man nicht nur die **Leistung** kennen (in Watt gemessen), sondern auch ihre **Dauer**. Den Stromverbrauch misst man in Kilowattstunden (kWh). Ein Kilowatt sind 1000 Watt. Wenn eine Maschine mit einer Leistung von 2000 Watt eine halbe Stunde lang läuft, verbraucht sie also eine Kilowattstunde. Ein durchschnittlicher Zweipersonenhaushalt verbraucht etwa 3000 kWh im Jahr (vier Personen: ca. 4000 kWh). Ein Megawatt sind eine Million Watt, ein Gigawatt sind eine Milliarde Watt oder eine Million Kilowatt.



BATTERIESPEICHER

Wenn die Sonne innerhalb kurzer Zeit kommt und geht, belasten die Schwankungen das Energienetz, weil sich die solare Stromgewinnung binnen Sekunden verändert. In so einer Situation braucht man Speicher, die blitzschnell reagieren. Batterien bieten sich da besonders an. Sie können entweder in großen Speichereinrichtungen stehen oder dezentral übers Land verteilt sein. Fachleute bezeichnen solche Schwarmssysteme als **virtuelles Kraftwerk**. »Wenn in jedem Einfamilienhaus eine Fünf-Kilowattstunden-Batterie bereitsteht, ergibt das einen riesigen Speicher«, sagt der Energie-Experte Volker Quaschnig von der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Berlin.



STEINE SPEICHERN STROM

Eine auf den ersten Blick etwas skurril wirkende Speichertechnologie testet Siemens gerade gemeinsam mit Partnern in Hamburg: Überschüssiger Strom soll einen gigantischen **Heißluftföhn** antreiben, der einen **Steinhaufen** auf 600°C erhitzt. Bei Strombedarf saugen Lüfter die Hitze wieder ab und leiten sie auf Turbinenschaufeln. Die Energie lässt sich bei guter Isolierung rund eine Woche lang speichern. »Das Aufladen dauert etwa sechs Stunden, und der Temperaturverlust beträgt nur rund 15°C«, sagt Projektleiter Till Barmeier.

In der Versuchsanlage sollen rund 2000 Kubikmeter Gestein 36 Megawattstunden Strom speichern – genug, um neun Vierpersonenhaushalte ein Jahr lang zu versorgen. Barmeier: »Wir peilen im kommerziellen Einsatz einen Speicherpreis von weit unter zehn Cent je Kilowattstunde an, was viel günstiger ist als alle bekannten Batteriespeicher und anderen Technologien.« Experten planen, in der kommerziellen Phase enorme Steinhaufen aufzuschütten. Oder bereits bestehende zu nutzen: Die Schlacke in stillgelegten Kohlekraftwerken bietet sich an, hier ist auch die gesamte Infrastruktur bereits vorhanden.

»Wenn jedes Haus eine Fünf-Kilowattstunden-Batterie besitzt, ergibt das einen riesigen Speicher.«

Volker Quaschnig, Ingenieur und Energie-Experte

Nichts als heiße

Mehr Schein als Sein: Wenn Kampffjets oder Panzer wie aus dem Nichts auftauchen, könnten strategische Täuscher am Werk sein. Deren wichtigstes Werkzeug: eine Luftpumpe

TEXT: CHRIS LÖWER

Auch aus 100 Meter Nähe sind die aufblasbaren Jets der russischen Firma Rusbal kaum als Fake zu erkennen. Die Flugzeuge sehen sogar auf dem Radar oder durch Nachtsichtgeräte betrachtet echt aus.



LUF





Ultraleichtflugzeug:
Eine aufblasbare MiG
wiegt gerade mal
250 Kilogramm –
und kann von ein paar
Soldaten zu Fuß zum
Einsatzort geschleppt
werden.

Zwei Männer im legeren Camouflage-Look auf dem Weg ins Campingwochenende? Sie schleppen einen schweren Nylonsack durchs Gelände. Doch die beiden wuchten hier kein geräumiges Familienzelt durch den Wald, sondern eine echte russische Geheimwaffe, die gleich auf einer idyllischen Wiese ihre gesamte Wirkmacht entfalten wird. Was sich da wie aus dem Nichts aufbäumt, ist ein aufblasbarer T-80-Panzer. Kaum ist seine schlaffe Hülle ausgebreitet, brummt auch schon der mit Diesel betriebene Kompressor – keine fünf Minuten und das Ding steht, mit straffer Glattohrkanone, den Feind fest im Visier. Absolutes Lowtech. Aber täuschend echt, zumindest aus der Entfernung betrachtet.

Mit einem ganzen Arsenal aufblasbarer Waffenattrappen möchte die russische Armee größer scheinen, als sie ist. Den Gegnertäuschen, verwirren, und fremde Militärs spione so richtig in die Irre führen. Die strategischen Trickser belassen es auch nicht bei Panzern, Jeeps und

Einen Spezial-Stützpunkt fürs Tarnen und Täuschen

besitzt die Bundeswehr. Im brandenburgischen Storkow werden Techniken zur Feindverwirrung entwickelt und geübt.

**Holzlatten, Plane,
Ofenrohr: Fertig ist der
serbische »Panzer«,
auf den im Kosovo-
krieg die Zielerfassung
der US-Kampffjets so
oft ansprang.**

Truppentransportern, nein, im Sortiment der luftigen Abschreckung finden sich sogar die Interkontinentalraketen Topol-M und Jars, das fahrbare Raketenabwehrsystem S-300, der Kampffjet MiG-31 und ganze Radarstationen. Der T-80-Panzer gilt als »Standardprodukt«, kostet rund 16 000 US-Dollar und hat eine Lieferzeit von drei Monaten, lässt die Herstellerfirma Rusbal wissen. Sie gilt als heimlicher Marktführer in diesem sehr speziellen Geschäft. Wie viele Exemplare

ihrer Pop-up-Waffen bisher an das russische Militär verkauft wurden, bleibt geheim. Allein vor sieben Jahren meldete die russische Nachrichtenagentur Interfax unter Berufung auf das Verteidigungsministerium, dass die Streitkräfte mit einem bunten Sortiment aus Scheinriesen ausgerüstet werden sollen.

Seither herrscht Schweigen.

Doch die 80 Rusbal-Mitarbeiter haben unverändert gut zu tun, versicherte die Direktorin der Firma, Maria Oparina, einem



Kampfschneiderei:
eine russische Näherin
mit Waffenattrappe

Reporter der »New York Times«. Allerdings werden in dem Unternehmen im Dorf Chotkowo, das vor den Toren Moskaus liegt, auch noch Hüpfburgen und allerlei andere aufblasbare Gimmicks genäht.

Ursprünglich fertigte Rusbal vor allem Heißluftballons, bis dem Gründer Alexander Talanow die Idee zu seinen »pneumatischen Dummys« kam. Ganz abwegig war das für den studierten Raketenbauer und passionierten Ballonfahrer nicht. Und die Zeit war, wenn man so will, günstig: Anfang der goer-Jahre war die Sowjetunion zusammengebrochen, der Staat pleite, die einst stolze Armee siech. Da kam die Geschäftsidee zur »luftgestützten« Abschreckung gerade recht. Anfangs wurden Panzer, Flugzeuge und Raketenformen noch aus Gummi geklebt, was sie gewichtig machte, dann stieg Talanow auf den leichten Stoff Oxford 420D um. Und heute wiegt eine maßstabsgetreue MiG gerade 250 und ein T-80-Panzer 90 Kilogramm. Damit schaffen es ein paar Mann auch zu Fuß durchs Gelände.

Damit die Dinger nicht wie olivfarbene Hüpfburgen aussehen, wird Rusbal von der Moskauer Militärakademie konstant mit aktuellen Konstruktionsplänen versorgt. So wird sichergestellt, dass detailgetreue Attrappen ins Feld ausrücken.

Ausbreiten, aufpumpen, Gegner verwirren: Auf der Wiese vor der Ballon-Firma Rusbal nahe Moskau demonstrieren Mitarbeiter, wie schnell sich die täuschend echte Attrappe einer S-300-Raketenabschussrampe installieren lässt.

Weder Drohnen noch die Piloten von Kampffjets sollen aus der Luft Original und Fälschung auseinanderhalten können. Wobei dies aber zumindest mit modernen Drohnen gelingen dürfte – sie fliegen langsamer und liefern hochauflösende Bilder. Allerdings müssen solche Fotos immer erst ausgewertet werden. Das braucht Zeit, die im Zweifel entscheidend sein kann. Denn während sich die Aufklärung fälschlicherweise auf eine Horde Luftküsse konzentriert, kann

Falsches Hamburg

Täuschung sollte britischen Bombern 1940 über Hamburg das Zielen erschweren: Die Binnenalster wurde mit Netzen getarnt und auf der Außenalster eine falsche Brücke installiert – als sei die Stadt ein Stück verschoben.

der wahre Truppenaufmarsch an anderer Stelle ungehindert vonstattengehen.

Freilich, die »pneumatischen Dummys«, so heißt es bei Rusbal, dienen nun mal »dem Zweck der Desinformation«. Und das ist ein Effekt, der äußerst kostengünstig zu haben ist, werben die Russen. Gleichwohl droht bereits Konkurrenz aus der Nachbarschaft: Auf der chinesischen Internet-Handelsplattform Alibaba sind aufblasbare Panzer in passabler Nachbildung ab 1000 US-Dollar zu haben. Sogar ganze Hangars, die sich in drei Stunden aufblasen lassen, werden offeriert.

Besonders ausgefeilte Attrappen strahlen Wärme ab, indem kontinuierlich erhitzte Luft nachgepumpt wird, und reflektieren Funkwellen, damit Radar und Infrarotgeräte nicht Alarm schlagen. Dass solche Täuschung auch ungeachtet hochauflösender Luftaufklärung noch wirken kann, bestätigt Oberstleutnant Georg Küpper vom Ausbildungszentrum Munster der Bundeswehr: »Ja, das funktioniert, wenn man es denn richtig macht.« So gelang es etwa den Serben im Jugoslawienkrieg die US-Airforce zu täuschen, indem simple Panzerattrappen, etwa aus Tetrapaks, die Sensorik von Aufklärungsflugzeugen hinter Licht führten. »Die Amerikaner waren nicht glücklich, als sie erkannten, dass sie ihre Bordwaffen aufgrund eines Schrottautos mit angelegtem Ofenrohr auslösten, weil sie darin scheinbar einen Kampfpanzer ausgemacht hatten«, erzählt Küpper. »So wurden nur wenige echte Panzer aus der Luft vernichtet.«

Auch bei der Bundeswehr setzt man auf Nebelkerzen: Im ▶



Technologiestützpunkt »Tarnen und Täuschen« werden Zugführer und Kompaniechefs darin ausgebildet, wie man mit einfachen Mitteln bei der gegnerischen Aufklärung Verwirrung auslöst. Viel verrät Küpper natürlich nicht. Er lässt sich aber doch eine kleine taktische Schnurre entlocken: Stichwort »Scheinminensperre«. Soldaten verstreuen dabei Verpackungsmaterial von Minen, was den Gegner glauben macht, vor vermeintem Gelände zu stehen – er ist dann überrascht, wenn der Gegenangriff auf ihn direkt über das vermeintlich explosive Feld erfolgt. Außerdem lasse sich durch Attrappen das eigene Gerät schützen, wenn stattdessen Pappmaché bombardiert werde.

Bei allem ist Küpper eine Botschaft wichtig: »Tarnen und Täuschen ist ein weites Feld. Und es geht weit raffinierter als mit aufgepumpten Fahrzeugen.« Keine der NATO-Nationen unterhalte Kräfte, die mit Luftattrappen befasst seien: »Diese Bilder von Lagerhallen mit aufblasbaren Panzern entsprechen nicht der

Realität der westlichen Welt.« Was nicht heißen soll, dass es nicht in anderen Streitkräften Soldaten mit Pumpe gibt.

Wobei es im Osten durchaus eine Tradition für solche Finessen gibt. »Der Warschauer Pakt unterhielt in den Mitgliedsnationen weitreichende Täuschungskapazitäten«, erinnert sich Küpper. Mit ganzen Truppen, speziellen Waffensystemen und auch Brücken, die es gar nicht gab, sollten NATO-Truppen in die Irre geführt werden. Tatkraftig unterstützt von der Nationalen Volksarmee der DDR, die sich durch äußerst trickreiche Illusionskünstler hervortat. Die Werkstatt war so gut, dass sie bis heute als Dienststelle der Bundeswehr überlebt hat, in der Attrappen zu Ausbildungszwecken gefertigt werden.

Die Wahrheit stirbt im Krieg zuerst und Kriege sind immer auch ein Schlachtfeld der Geheimdienste, was der Zweite Weltkrieg eindrucksvoll vor Augen führte. Weit weniger bekannt als die damals



»Grüne Männchen«

So wurden Kämpfer ohne Hoheitsabzeichen genannt, die 2014 in der Ostukraine und auf der Halbinsel Krim auftauchten. Heute weiß man: Es waren russische Soldaten – sie sollten nur nicht als solche zu erkennen sein.

Ganz leichte Artillerie: Eine Sondereinheit der U.S. Army verwirrte im Zweiten Weltkrieg die Deutschen – sie wurde als »Geisterarmee« bekannt.



Potemkin grüßt

KULISSENORTE Ansiedlungen, die etwas vorgaukeln, nennt man »Potemkinsche Dörfer«. Angeblich soll der russische Fürst Potemkin auf der Reiseroute seiner Zarin den Bau hübscher, falscher Dörfer veranlasst haben. Heute wird oft das nordkoreanische Dorf **Kijöng-dong** angeführt (oben). Es liegt in der demilitarisierten Zone und soll fast 1000 Einwohner haben. Südkorea bezeichnet es als »Propaganda-Dorf«, wo Soldaten Licht und Lautsprecher an- und ausschalten. Auch **Güstrow** wurde 1981 zum Potemkinschen Dorf. Zum Besuch von Bundeskanzler Schmidt wurde von der Stasi ein buntes Stadtleben inszeniert. Im nordirischen **Enniskillen** lebte die britische Regierung zum G8-Gipfel im Jahr 2013 Fototapeten in leer stehende Geschäfte.

exzessiv betriebenen Aktionen klassischer Desinformation ist ein äußerst erfolgreiches Täuschungsmanöver einer streng geheimen US-Einheit mit dem Namen »23rd Headquarters, Special Troops«.

Die betrieb nämlich eine Attrappen-Armee unbekannten Ausmaßes und griff damit auch entscheidend in das Kriegsgeschehen ein. Die 1100 Soldaten der Einheit wurden intern auch »Geisterarmee« und »Gummiarmee« genannt. Kein Wunder, denn ihnen gelang es mit aufblasbarem Kriegsgerät, vom Jeep bis zum Jet, eine Truppenstärke von 30 000 Mann vorzutäuschen. Der größte Coup gelang im Vor-



Während russische Täusch-Experten eher Luft-Varianten russischer Waffensysteme anbieten (oben), haben die Kollegen der tschechischen Firma Inflatech auch den Kampfpanzer Abrams des ehemaligen Klassenfeindes USA im Sortiment (Bild unten).



Chris Löwer hat mit aufblasbaren Sachen persönlich eher schlechte Erfahrungen gemacht: Vom Kinderpool bis zum Kanu ließen Löcher nie lange auf sich warten.

feld des D-Day, der Invasion in der Normandie im Juni 1944. Die Gummiarmee lenkte die Deutschen damals gezielt von dem echten Aufmarsch und Landungsgebiet ab. Nicht nur Luftpumpen gehörten zur Ausrüstung, sondern auch Lautsprecher, aus denen das Dröhnen von Panzern, Kommandos, Artilleriefeuer und quietschende Bremsen von Truppentransportern drangen. Alles eingebettet in eine authentische Lichtshow. Raupen und Bagger hinterließen Spuren von Panzern, die in Wahrheit ganz leicht und nur mit Luft gefüllt waren. Die wohl friedfertigsten Soldaten des Zweiten Weltkriegs haben »möglich-

weise 40 000 echten Kämpfern das Leben gerettet, indem sie die Wehrmacht täuschten und von Angriffen abhielt«, schätzt der US-Journalist Jack Kneee in seinem Buch »Ghost Army of World War II«.

Und wie es scheint, ist die Luft bei den Gummipanzern noch lange nicht raus. Russland soll sie 2008 im Waffengang gegen Georgien zur Täuschung eingesetzt haben, auch in der Ostukraine wird über ihren Einsatz spekuliert. Für Oberstleutnant Küpper hat Täuschung jedenfalls ungeachtet moderner Aufklärungstechnik eine Zukunft: »Ohne Wenn und Aber!«, sagt er. Aus einem einfachen Grund: »Wer mich nicht erkennt, kann mich nicht gezielt bekämpfen. Mit einfachen Mit-

teln kann ich einen Gegner auf eine falsche Fährte locken.« Natürlich müssten Taktik und Mittel immer wieder verändert werden.

Ob sich das Geschäftsmodell von Rusbal auf Dauer behaupten wird, scheint fraglich: »Täuschung im größeren Stil findet heutzutage zumeist elektronisch statt. Es werden Dinge vorgegaukelt, hinter denen tatsächlich etwas ganz anderes steckt«, berichtet Küpper. »Das Radarbild unserer Fregatten kann beispielsweise wie der Radarschatten eines zivilen Fischerboots aussehen.« Ganz zu schweigen von den perfiden Einflussmöglichkeiten in der digitalen Welt: »Wenn man das Thema Tarnen und Täuschen auf den Cyberraum ausdehnt, ergeben sich viel mehr Spielarten und Möglichkeiten«, frohlockt Küpper. ■

PM. KOMPAKT

- Attrappen von Kriegsgeräten waren bereits im Zweiten Weltkrieg für alle Kriegsparteien ein gängiges Mittel, um einem Gegner **militärische Stärke** vorzugaukeln.
- Vor allem nach dem **Zusammenbruch der Sowjetunion** und in der darauffolgenden Wirtschaftskrise hat die russische Armee diese Methoden ausgebaut.
- Erfolge hat mit dieser Taktik auch die jugoslawische Armee im **Balkankonflikt** erzielt, die mit falschen Panzern die Zielerfassung der US-Kampfflotts irritierte.

NEUGIERIG AUF MORGEN

P.M. 4,00 € 06/2017

P.M.

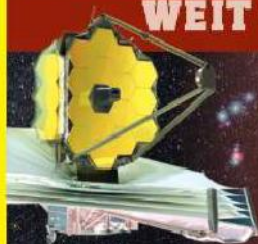


DROHNEN

Was sie können Was sie dürfen

WEIT GEBLICHT

Zeitreise
zum
Urknall



HOCHGERECHNET

Was ist ein
Korallenriff
wert?



TIEFGEFROREN

Warten auf
das zweite
Leben



4 190584 404007 06

NEUGIERIG AUF MORGEN

4,30 € 11/2017

P.M.

P.M.



GESCHÜTZT

Wie kontaktiert man isolierte Völker?

GESCHÜRFT

So entkommen wir der Abhängigkeit von Seltenen Erden

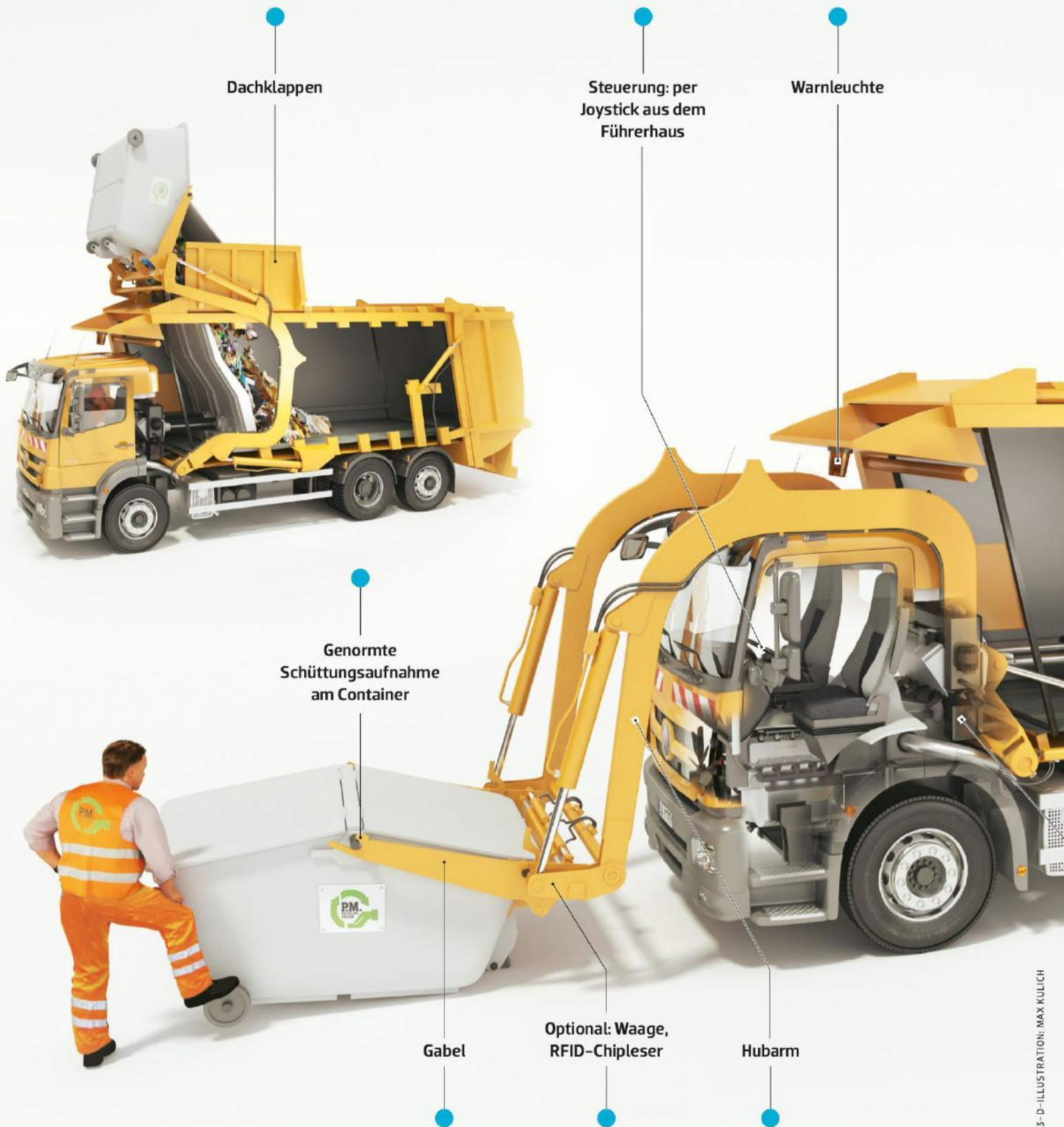
GEPANZERT

Wie neue Fahrzeuge Soldaten besser sichern sollen

AN DEN **GRENZEN** UNSERES **WISSENS**

Bestseller-Autor **STEFAN KLEIN** über Phänomene, die wir nie verstehen werden

4 1190584 404304





DURCHBLICK

Das Müllfahrzeug

ENTSORGUNG Als die Stadt Hamburg ihren Dreck 1597 erstmals geregelt abtransportieren ließ, wütete die Pest, und Sträflinge mussten den Unrat mit Handkarren wegschaffen. Später zogen Pferde oder Ochsen die **Abfallsammelwagen**. Erst in den 1920er-Jahren setzten sich motorisierte Gefährte durch.

Moderne Müllfahrzeuge gibt es in drei Varianten: Hecklader kippen den Inhalt der Tonnen hinten ein, Seitenlader seitlich. **Frontlader** heben Container mit bis zu zehn Kubikmeter Fassungsvermögen übers Führerhaus zur Schüttung. Der Fahrer muss dazu nicht einmal aussteigen: Per Joystick klinkt er die Gabel ein, fährt den Behälter hoch und leert ihn. Im Inneren des Laderaums verdichtet eine **hydraulische Presse** den Abfall. Bei Heckladern des Typs »Rotopress« kommt stattdessen eine Drehtrommel zum Einsatz: Eine Förderschnecke an der Trommelwand transportiert Müll tiefer in den Wagen und zerkleinert ihn dabei. Die Stadtreinigung Hamburg zum Beispiel sammelt Weggeworfenes mit 202 Fahrzeugen ein; davon haben 161 eine Drehtrommel, drei sind Frontlader.

Manche Müllfahrzeuge wiegen die Behälter beim Heben oder identifizieren jede Tonne anhand eines Funkchips. So zahlen Anwohner nur für die tatsächliche Leerung und sparen eventuell Geld. Volvo testet ein **selbstfahrendes Modell**: Es folgt dem Müllmann rückwärts durch die Straße und wartet auf Fütterung.



Hydraulikzylinder

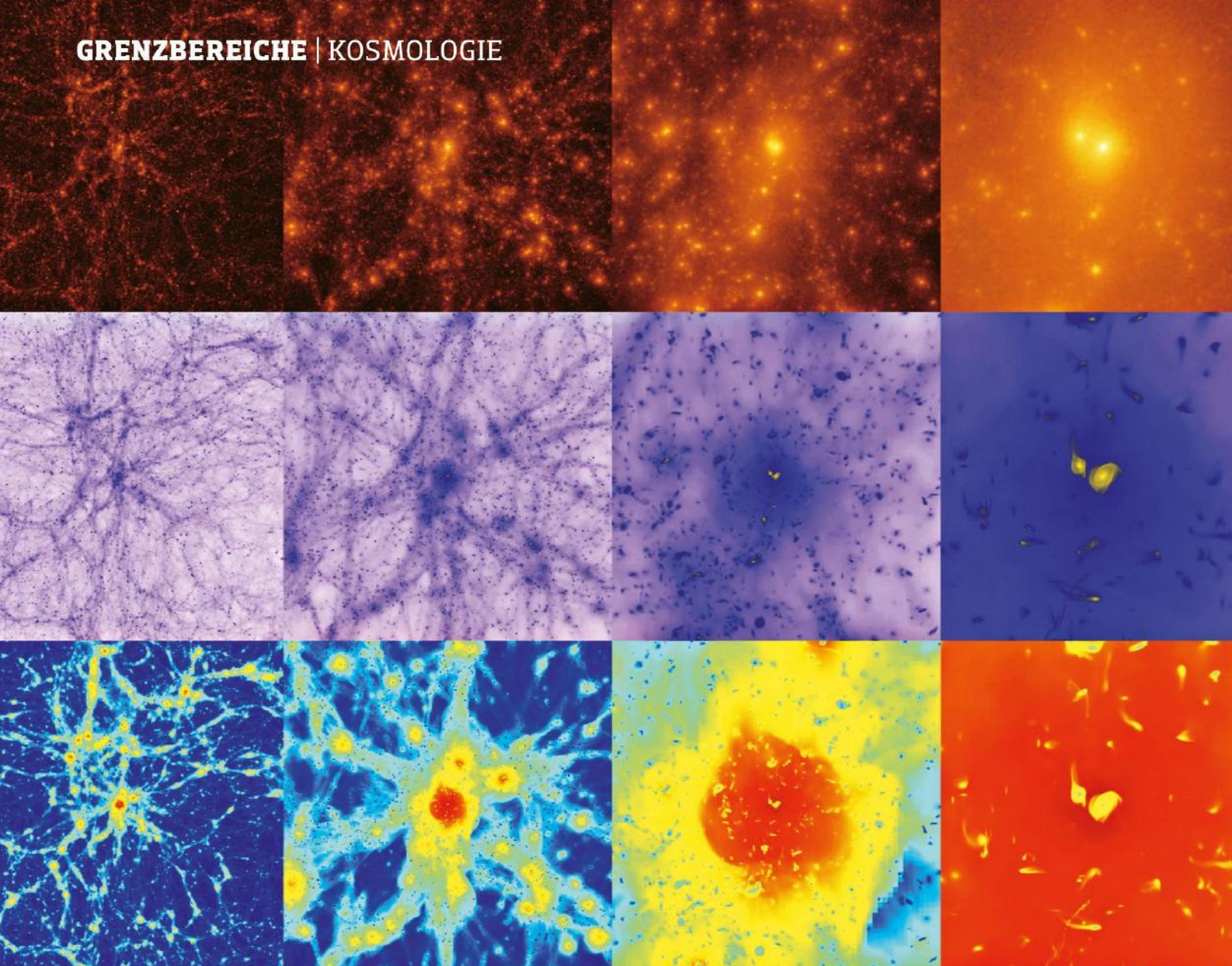
Pressschild

Laderaum

Öltank für die Hydraulik

Seitlicher Anfahrerschutz

Heckklappe zum Ausladen

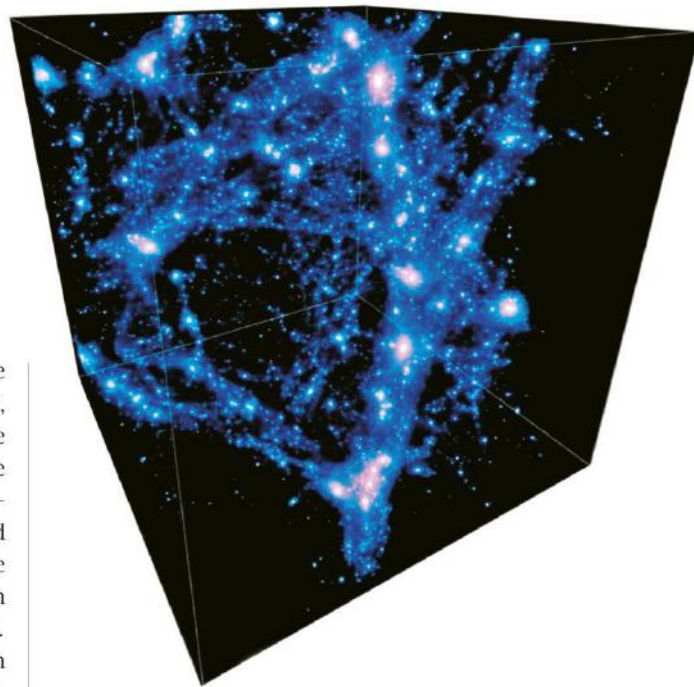


SIMULIERTE

Zoom auf einen Sternenhaufen: Die Simulation des Computers »MareNostrum« stellt hier die Verteilung von Dunkler Materie, interstellarem Gas, Temperatur, Schwermetallen und Sternenlicht (von oben nach unten) in einem Ausschnitt des Universums dar – vor rund drei Milliarden Jahren.

Das Universum passt in eine Kirche – nicht komplett, aber zumindest seine wichtigsten Teile: Sterne und Planeten zum Beispiel oder Galaxien und jene mysteriöse Dunkle Energie, die die Weiten des Weltalls ausfüllen soll.

Es passt aber auch in einen kalten Kellerraum oder in ein modernes Rechenzentrum. Es passt überall dorthin, wo Kosmologen – wie in der alten Kirche auf dem Campus der Universität von Barcelona – ihre Superrechner aufstellen. Denn obwohl Teleskope so tief und so scharf ins All blicken wie nie zuvor, können Forscher nicht auf Simulationen verzichten, mit denen die Zusammenhänge im



Die Simulation »Illustris« untersucht die Evolution des Universums in den Grenzen eines Würfels. Kantenlänge: 350 Millionen Lichtjahre.

Kosmos durch Rechenvorgänge nachgeahmt werden. Sie packen dazu das Universum, seine Himmelskörper und alle seine Gesetze in immer ausgefeiltere Modelle – in der Hoffnung, dem großen kosmischen Zusammenspiel von allem mit allem seine letzten Geheimnisse zu entlocken.

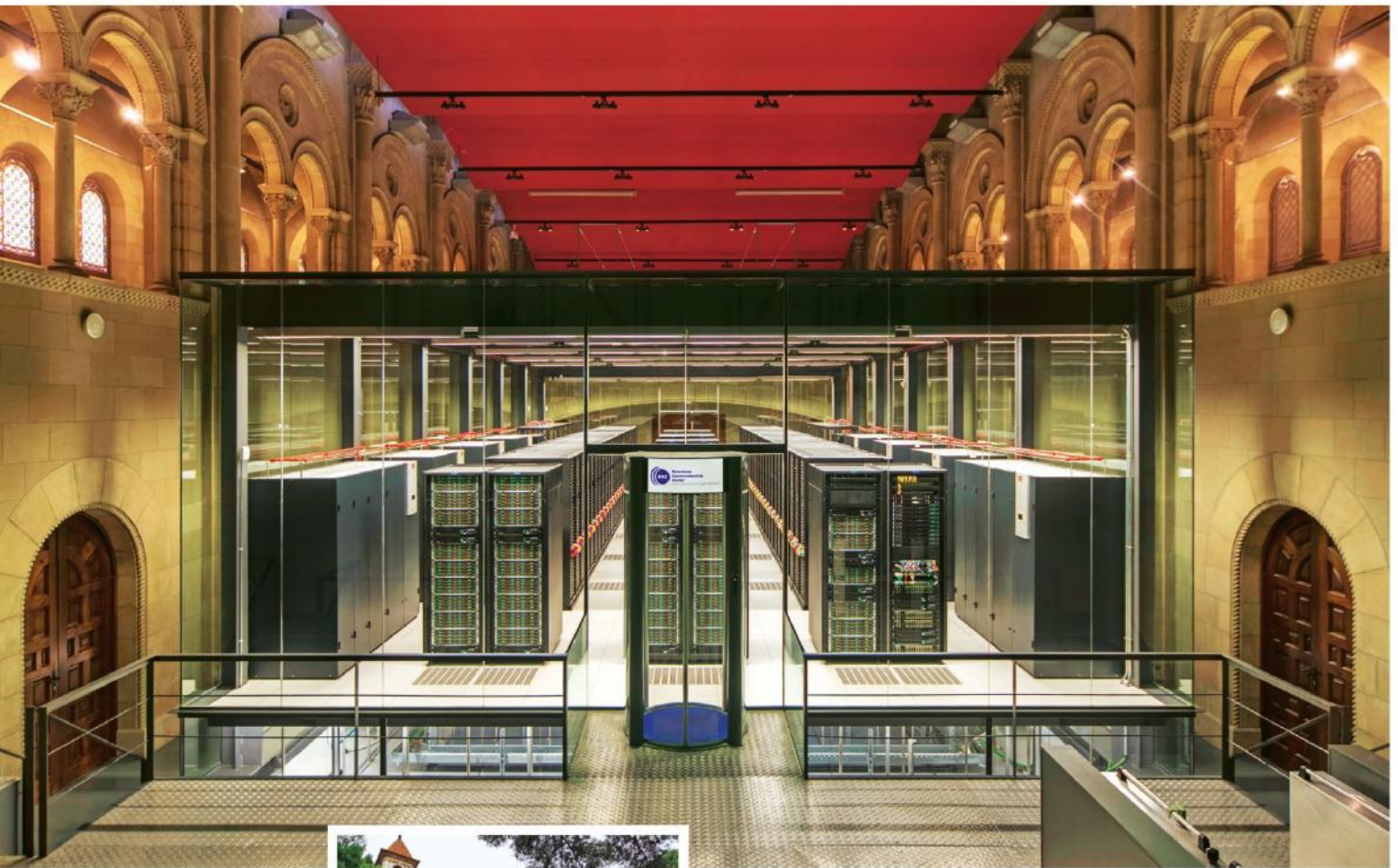
»Unsere Teleskope liefern natürlich tolle Beobachtungsdaten, aber wir möchten auch verstehen, was wir da sehen«, sagt Volker Springel, Astrophysiker am Heidelberger Institut für Theoretische Studien und einer der führenden Experten für Weltraum-Simulationen. Denn am Verständnis hapert es in der modernen Kosmologie: Allein mit dem, was wir durch Teleskope sehen, und den bekannten physikalischen Gesetzen lässt sich weder erklären, welche Kraft Galaxien zusammenhält, noch warum sich das Universum immer schneller ausbreitet.

Um diese messbaren Fakten auch begründen zu können, haben Theoretiker zwei unsichtbare Phänomene ersonnen, die sie Dunkle Materie und Dunkle ►

WELTEN

Sicher: Wir werden das All nie ganz begreifen. Trotzdem simulieren Astronomen unverdrossen komplette Universen in Superrechnern – und entdecken Erstaunliches

TEXT: ALEXANDER STIRN



Rechenpower statt Altar: Der Supercomputer »Mare Nostrum« steht in einer Kapelle in Barcelona, umgeben von fünf Meter hohen Glaswänden.



»Unser grundsätzliches Verständnis vom Universum ist korrekt«

Mark Vogelsberger, Simulationsexperte

Energie nennen (erstere hält Galaxien mit ihrer Schwerkraft zusammen, letztere treibt unser Universum auseinander). Zusammen müssen die beiden seltsamen Stoffe für 95 Prozent der Masse im Universum verantwortlich sein. Ein Gedankenkonstrukt, damit das Modell wieder zu den Messwerten passt: Was sich hinter dem dunklen Geheimnis wirklich verbirgt, kann noch niemand mit Sicherheit sagen.

»Natürlich glaube ich an die Idee und halte sie für gut begründet, aber solch eine Hy-

20

Terabyte

Arbeitsspeicher hat der inzwischen stark aufgerüstete Rechner MareNostrum. Heute wird er vor allem für Biowissenschaften genutzt.

pothese ist erst einmal starker Tobak«, sagt Springel. Genau deshalb starten er und seine Kollegen Simulationen. Die Berechnungen sollen Forschern helfen, selbst die absurd erscheinende Idee von riesigen Mengen unsichtbarer Stoffe im All wissenschaftlich zu unterfüttern.

Zuletzt hat sich daran »Illustris« erfolgreich versucht, das anspruchsvollste Simulationsprojekt der vergangenen Jahre. Innerhalb von drei Monaten berechneten Supercomputer, wie sich ein würfelförmiger Ausschnitt des Universums mit einer

Kantenlänge von 350 Millionen Lichtjahren vom Urknall bis heute entwickelt hat – also mehr als 13 Milliarden Jahre lang. Hierfür fütterten die Forscher ihre Modelle mit den Anfangsbedingungen, zum Beispiel mit der berechneten Materieverteilung im Raum kurz nach dem Urknall.

Dazu bekamen die Computer die Gleichungen über die Wirkungen und Wechselwirkungen aller bekannten Kräfte einprogrammiert sowie die Annahmen der Experten zu den Eigenschaften der Dunklen Energie und der Dunklen Materie. So ausgestattet

machten sich die Rechner an die Arbeit. Sie kalkultierten, wie sich die Kräfte von diesem Ausgangspunkt und nach diesen Regeln im Weltall ausgetobt haben müssten und was sie dabei alles formten. Nach und nach entstanden so 50 000 virtuelle Galaxien in dem simulierten Weltall-Würfel.

Faszinierend. Aber für die Kosmologen ist das nur der erste Schritt: Jede Simulation muss ihr Ergebnis stets an der beobachtbaren Realität messen lassen. Im Fall des »Illustris«-Universums verglichen die Forscher daher die Formen und die Eigenschaften der in der Simulation entstandenen Galaxien mit Ergebnissen der großen Teleskope, also mit dem, so weit wir sehen können, »echten« Ergebnis der Evolution unseres Universums. »Wir machen dabei so eine Art Bevölkerungsstatistik«, sagt Springel. »Wir schauen unter anderem: Was ist die mittlere Masse der Sterne, die sich gebildet haben, was ist der typische Radius? Für all das gibt es ja Beobachtungsdaten.«

Bei »Illustris« stimmten die berechneten Galaxien ziemlich exakt mit den beobachteten überein – zumindest wenn auch die Schwerkraftwirkung der angenommenen Dunklen Materie mitsimuliert wurde. In Test-Universen ohne diesen hypothetischen Stoff (oder mit bewusst falschen Werten für dessen Einfluss) lagen die Ergebnisse der Simulation daneben. »Das zeigt, dass unser grundsätzliches Verständnis von der Funktionsweise des Universums korrekt und vollständig sein muss«, sagt Studienleiter Mark Vogelsberger vom Massachusetts Institute of Technology.

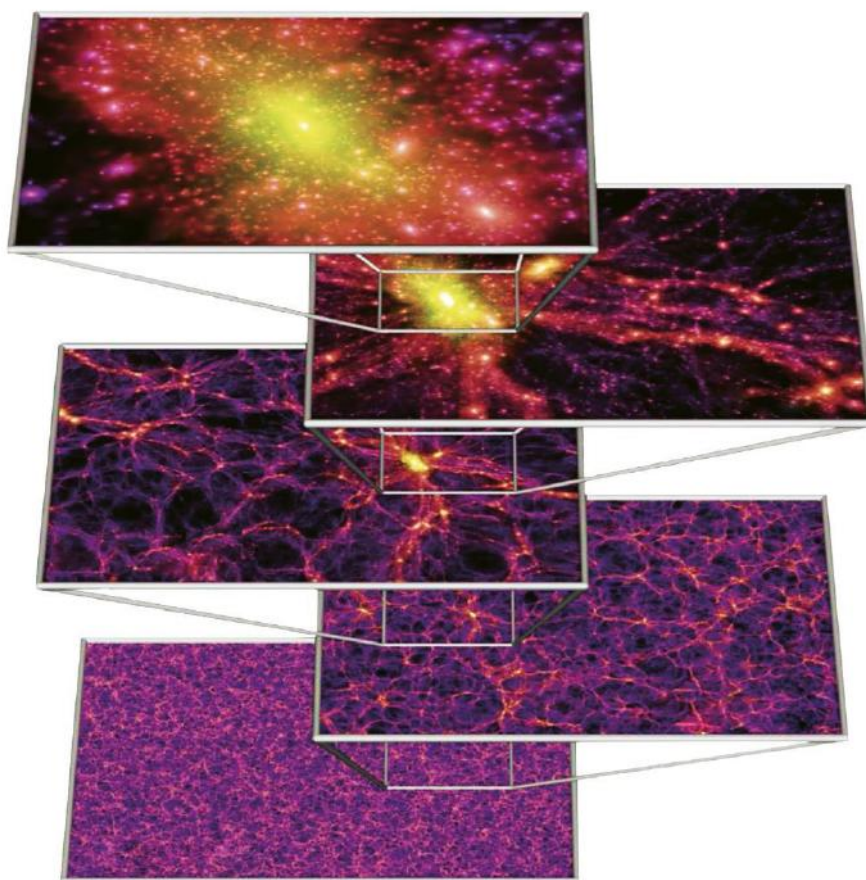
Simulationen helfen Physikern indes nicht nur, ihre Theorien zu überprüfen, sie ermöglichen auch bessere Beobachtungen. Zum Beispiel beim Large Synoptic Survey Telescope (LSST), das derzeit in Chile entsteht. Das LSST ist ein extremes Weitwinkelobjektiv für Astronomen. Dank einer großen Öffnung und einer Kamera mit 3,2 Milliarden Pixeln kann es den gesamten südlichen Himmel innerhalb von drei Nächten fotografieren – und es wird das immer wieder tun, zehn Jahre lang.

Algorithmen sollen dann in den riesigen Mengen von Bild-
daten nach Spuren der Dunklen Materie suchen. Die ist zwar unsichtbar, verrät sich aber indi-

Simulierte Dunkle Materie: Auf großen Skalen (mehrere Milliarden Lichtjahre, ganz unten) scheint alles homogen. Erst im Zoom zeigt sich die in Fäden verteilte Dunkle Materie als Rückgrat des Alls. Die Verdickungen an den Schnittpunkten sind Galaxien. Oben: ein Galaxienhaufen, etwa zehn Millionen Lichtjahre breit

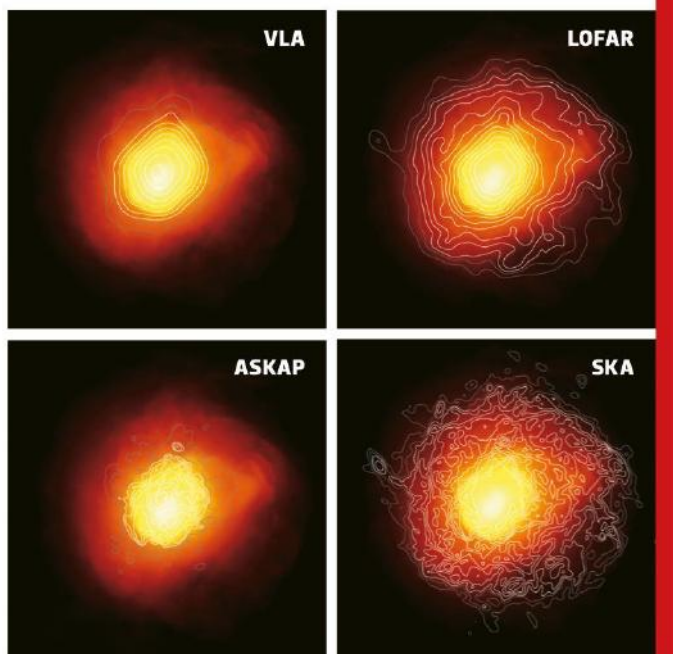
rekt: Schiebt sich ein Klumpen des seltsamen Stoffs vor eine Galaxie, dann lenkt seine Schwerkraft das Sternenlicht auf dem Weg Richtung Erde leicht ab. Der Effekt sollte auf den Bildern zu erkennen sein. Unklar ist nur, wie deutlich er ausfällt. Und das macht es für die Software schwierig, solche Effekte zu suchen.

Hier kommen Simulationen ins Spiel. Um zu testen, was auf die Algorithmen der Teleskop-Software zukommt (und um so ihren Blick zu »trainieren«), bedienen sich die LSST-Forscher bei den großen Kosmos-Modellen. Sie berechnen für jeden simulierten Stern, welchen Weg sein Licht Richtung Erde nimmt, wie es durch massive Objekte ►



Simulieren hilft auch beim Anvisieren

FUTTER FÜR DIE TELESKOPE Bis zu 100 Millionen Grad heiß ist das Plasma um diesen Galaxienhaufen. Es sendet Röntgenstrahlen aus, die von einem Röntgenteleskop beobachtet werden können (orangefarbener Verlauf). Wie aber würden Radioteleskope diese Galaxien »sehen«? Sie fangen hier nur die »Synchrotronstrahlung« ein, die an **Magnetfeldlinien** entsteht. Um spätere Beobachtungen zu erleichtern, kann die Simulation »Illustris« berechnen, wie dasselbe Objekt von verschiedenen Teleskopen erfasst würde. Hier im Vergleich: das Very Large Array (VLA), das Low Frequency Array (LOFAR), das australische ASKAP und das noch im Bau befindliche Square Kilometre Array (SKA).



abgelenkt wird, wie stark die Erdatmosphäre stört und was die Spiegel des Teleskops daraus machen. Als Härtestest will Simulationsexperte Andrew Connolly ein Zehntel der Bilder, die während des LSST-Betriebs ab 2022 anfallen sollen, vorher simulieren. Mithilfe dieser Beispiele werden sich die »echten« gemessenen Daten des Teleskops besser interpretieren lassen.

Bei alledem helfen immer genauere Kenntnisse der Physik und nicht zuletzt Fortschritte in der Computertechnik: Für das sogenannte MareNostrum-Universum, vor zehn Jahren mit zwei Milliarden Einzelelementen aus Gas und Dunkler Materie das anspruchsvollste Modell seiner Zeit, mussten 512 Prozessoren 447 Stunden lang rechnen – untergebracht in einer Kapelle aus

dem 19. Jahrhundert, die inzwischen von der Polytechnischen Universität von Katalonien in Barcelona umgeben ist. Ein einzelner Computer hätte dafür 29 Jahre gebraucht.

Fünf Jahre später konnte die »Millennium XXL«-Simulation bereits 300 Milliarden Elemente berechnen. Der JUROPA-Supercomputer am Forschungszentrum Jülich stellte dafür 12 000 Prozessorkerne zur Verfügung, ein normaler Arbeitsplatzrechner wäre 300 Jahre lang beschäftigt gewesen. Und für »Illustris« hätte ein herkömmlicher Computer sogar 2000 Jahre benötigt.

Volker Springel und seinem Team stehen inzwischen sogar noch leistungsfähigere Maschinen zur Verfügung. SuperMUC zum Beispiel: Der Computergigant am Garching Leibniz-Rechenzentrum bietet weit mehr als 200 000 Rechenkerne auf und ist mehr als 100-mal so schnell wie MareNostrum vor zehn Jahren.

Ausschöpfen können Kosmologen dieses Potenzial allerdings nicht. Noch nicht. Superrechner sind darauf ausgelegt, unzählige kleine Rechenschritte parallel mit jeweils einem eigenen Prozessorkern auszuführen und so Geschwindigkeit zu gewinnen. Beim Universum stoßen sie allerdings auf ein Problem: die Schwerkraft.

»Als eine Kraft mit sehr langer Reichweite verkoppelt die Gravitation alles miteinander«, sagt Springel. Das macht es schwer, ein kosmologisches Problem in winzige unabhängige Häppchen zu zerteilen, mit denen Hochleistungsrechner ar-



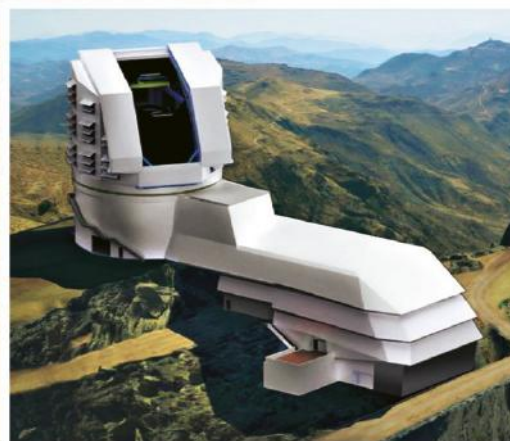
37

Milliarden

Sterne und Galaxien soll das Spiegelteleskop LSST ins Visier nehmen. Das wird der zugleich tiefste und weitwinkligste Blick ins All sein.



In der erfolgreichsten Kosmos-Simulation, die P.M.-Autor **Alexander Stirn** je programmiert hat, kreiste ein Mond um einen Planeten. Aber das immerhin unfallfrei.



Auf 2682 Meter Höhe wird in Chile das Large Synoptic Survey Telescope (LSST) gebaut. Ab dem Jahr 2022 wird es am Südhimmel unter anderem nach Spuren Dunkler Materie suchen, vorbereitet mithilfe von Simulationen.

beiten können. Etwa 10 000 parallele Schnipsel haben sich als gerade noch machbar erwiesen. Mehr würden mit ihren gegenseitigen Abhängigkeiten den Code sprengen, die Berechnung würde ineffizient. Am SuperMUC können die Forscher aus diesem Grund bislang nur fünf Prozent der verfügbaren Prozessorleistung sinnvoll nutzen.

Auch sonst sind die virtuellen Universen noch nicht perfekt. Physiker können zum Beispiel

noch immer nicht im Detail erklären, wie Sterne entstehen. Statt allgemeingültiger Formeln fließen zu diesen wichtigen Prozessen daher eher statistische Beobachtungsdaten in die Simulationen ein. Unter anderem erhöhen die Modelle in Regionen mit einer großen Gasdichte quasi automatisch die simulierte Geburtsrate neuer Sterne. Letztlich ist das aber eine Notlösung.

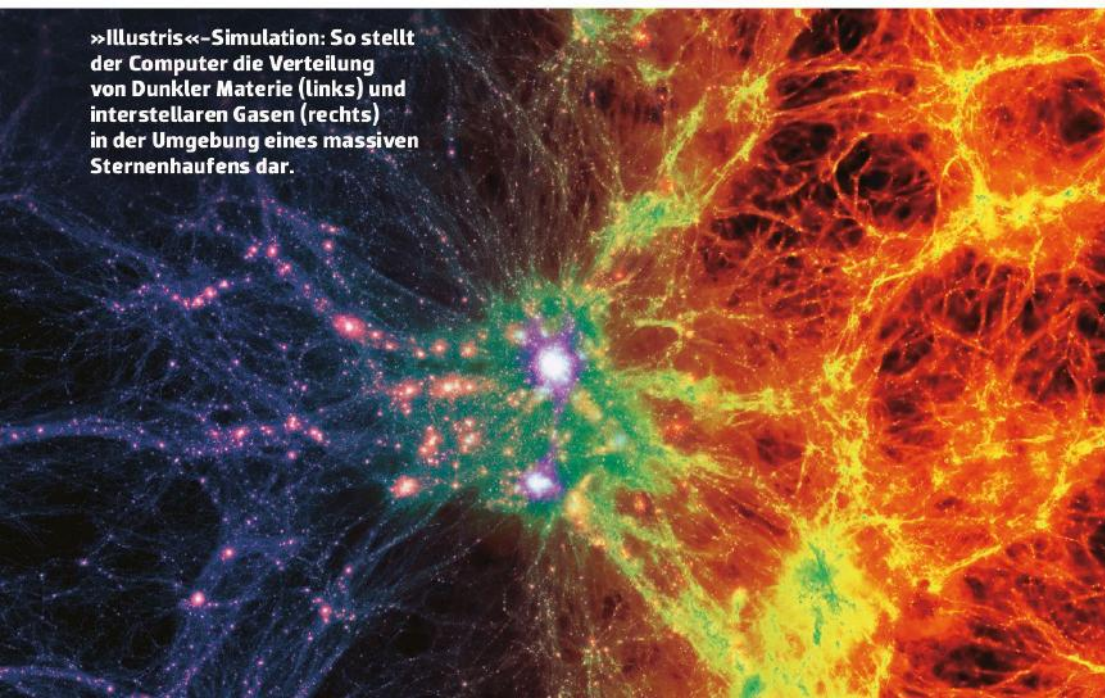
»Der Trend wird in Zukunft dahin gehen, die tatsächlich

stattfindende Physik im Modell immer realistischer abzubilden«, sagt Volker Springel.

Gegenwärtig wird nicht nur bei der Sternengeburt noch ziemlich viel getrickst: Die meisten Simulationen berücksichtigen lediglich die Schwerkraft und die dynamische Strömung der kosmischen Gase. Magnetfelder von Galaxien, die möglicherweise ebenfalls Einfluss auf die Sternentstehung und weitere Prozesse haben, werden hingegen ignoriert, um die Berechnungen zu vereinfachen.

Neue Simulationen sollen das ändern. Vor allem aber sollen sie auch die Strahlung von Sternen beachten, die Staub vor sich hertreibt und Gaswolken aufheizt. Noch ist diese sogenannte Strahlungshydrodynamik physikalisch schwer zu beschreiben und kaum in Zahlen zu packen. »Bisher waren die Computer dafür einfach nicht leistungsfähig genug«, sagt Springel. In Zukunft soll sich das ändern. Dann wollen die Forscher erstmals den kompletten kosmischen Lebenszyklus physikalisch korrekt simulieren – vom einzelnen Atom in Babysternen bis hin zu den gewaltigen Galaxien, die Nacht für Nacht am Himmel zu bestaunen sind. Und sie hoffen, auf diesem Weg viele spektakuläre Überraschungen zu erleben. ■

»Illustris«-Simulation: So stellt der Computer die Verteilung von Dunkler Materie (links) und interstellaren Gasen (rechts) in der Umgebung eines massiven Sternenhaufens dar.



PM. KOMPAKT

- Um zu verstehen, welche Mechanismen das **Universum** prägten, brauchen Forscher Simulationen.
- Rechner werden dazu mit Annahmen zur **Frühzeit des Alls** gefüttert und simulieren den Fortgang.
- Wenn das Ergebnis der Simulation zu den Beobachtungen von Teleskopen passt, beweist das die **Richtigkeit** der Annahmen.